جايمس غليك

نظريَّةُ الفوضى

علم اللّامُتوقَّع

مركز البابطين للترجمة
ALBABTAIN TRANSLATION CENTER

دار الساقي

نظريّةُ الفوضى
علم اللاّمُتوقَّع

جايمس غليك

نظريّةُ الفوضى
علم اللّامُتوقّع

ترجمة
أحمد مغربي

دار الساقي

James Gleick, CHAOS

الطبعة العربية

الطبعة الأولى ٢٠٠٨

ISBN 978-1-85516-665-3

دار الساقي
بناية تابت، شارع أمين منيمنة (نزلة السارولا)، الحمراء، ص.ب: ١١٣/٥٣٤٢ بيروت، لبنان
الرمز البريدي: ٦١١٤ ـ ٢٠٣٣
هاتف: ٣٤٧٤٤٢ (٠١)، فاكس: ٧٣٧٢٥٦ (٠١)
e-mail: alsaqi@cyberia.net.lb

مركز البابطين للترجمة
الكويت، الصالحية، شارع صلاح الدين، عمارة البابطين رقم ٣
ص.ب: ٥٩٩ الصفاة رمز ١٣٠٠٦، هـ ٢٤٣٠٥١٤

«الموسيقى إنسانية

أما الساكن فمن صُنع الطبيعة...»

جون أبدايك

المحتويات

مركز البابطين للترجمة (*)

«مركز البابطين للترجمة» مشروع ثقافي عربي مقره دولة الكويت، يهتم بالترجمة من اللغات الأجنبية إلى العربية وبالعكس، ويرعاه ويموّله الشاعر عبد العزيز سعود البابطين، في سياق اهتماماته الثقافية وضمن مشروعاته المتعددة العاملة في هذا المجال.

ويقدم المركز هذا الإصدار ضمن سلسلة الكتب الدورية المترجمة إلى العربية والتي يضعها أمام القارئ مساهمة منه في رفد الثقافة العربية بما هو جديد ومفيد وإيماناً بأهمية الترجمة في التنمية المعرفية وتعزيز التفاعل بين الأمم والحضارات.

وإذ يحرص «مركز البابطين للترجمة» على اختيار هذه الكتب وفق معايير موضوعية تحقق الغايات النبيلة التي أنشئ لأجلها وتراعي الدقة والإضافة العلمية الحقيقية، فمن نافل القول أن أي آراء أو فرضيات واردة في هذه الكتب وتم نقلها إلتزاماً بمبدأ الأمانة في النقل فإنما تعبر حصراً عن وجهة نظر كاتبها ولا تلزم المركز والقائمين عليه بأي موقف في أي حال من الأحوال، والله الموفق.

(*) للمراسلة والتواصل مع المركز: tr2@albabtainprize.org

تمهيد

لفترة وجيزة، قَلِقَ رجال الشرطة في بلدة «لوس آلموس»، في ولاية «نيو مكسيكو»، من أحوال رجل دأب على السير في الظلام، الليلة تلو الأُخرى، مُناقلاً وهج سيجارته المشتعلة في الشوارع الخلفية للبلدة. اعتاد أن يذرع الشوارع هائماً ساعات، تحت الفيض الخافت لضوء النجوم المُنسكب على البلدة. ولم يُثر الرجل عجب الشرطة وحدها.

فقد عرف بعض علماء الفيزياء في «المختبر الوطني» (ومقره «لوس آلموس») أن زميلاً جديداً لهم يُجرّب أن يعمل ٢٦ ساعة يومياً، مما يعني أن ساعات يقظته ستتداخل مع جداول عملهم. بدا ذلك غريباً، حتى للعاملين في قسم الفيزياء النظرية. فبعد ثلاثين سنة من اختيار روبرت اوبّنهايمر هذه المنطقة الغرائبية في «نيو مكسيكو» كموئل لمشروع صنع القنبلة الذريّة، مرّ «مختبر لوس آلموس الوطني» بمرحلة من الازدهار السريع، إذ جُلب إليه التقنيون ومُسرّعات الجزئيات وأدوات الليزر الغازي، إضافة إلى تحوّله إلى النقطة الأكثف عالمياً في عدد الحواسيب الخارقة (سوبر كومبيوتر).

يتذكر بعض قدامى العلماء المساكن الخشبية التي احتلت بسرعة التل الصخري في أربعينات القرن العشرين، حين تجمّع فريق القنبلة الذرية. ولم تعُدْ تلك الحقبة ورجالاتها سوى شبح في أعين أكاديميي «لوس آلموس» راهناً، الذين يذرعون المكان مرتدين ما يُشبه الزيّ الجامعي مع قمصان العمل.

واعتُبِر قسم الفيزياء النظرية، الذي يُعرف أيضاً باسم «القسم تي»، بؤرة للعمل الذهني

المُجرّد بشكله الأصفى. وأُشير إلى قسم الكومبيوتر باسم «القسم سي»، وحمل قسم الأسلحة اسم «القسم اكس». ضمّ «القسم تي» أكثر من مئة عالم فيزياء ورياضيات، ودُفعت لهم رواتب جيّدة لكي يتحرروا من ضغوط العمل الأكاديمي الذي يلزمهم بالتدريس والنشر.

ولقد اشتهروا بذكائهم وغرابة أطوارهم وخبراتهم. لذا، يصعب أن يجدوا أي شيء مُفاجئاً. ومع ذلك، مثّل ميتشل فايينبوم حالة خاصة بالنسبة إليهم. لم ينشر سوى مقال علمي منفرد باسمه. ولم يكن متُفرّغاً لدرس موضوع بعينه، ولم يَعد بإنجاز شيء ما. ويشبه شعره الأشعث، الذي ينفلت من جانبَي رأسه، صورة مؤلفي الموسيقى الألمان. وبدت عيناه غائرتين وعاطفيتين. يتكلم بسرعة، ساهياً عن إضافة الضمائر وحروف الجر، وفق عادة من يتعلم الإنكليزية من أهل أوروبا الشرقية، برغم كونه مواطناً أميركياً أصيلاً من بروكلين في نيويورك! ويعمل بهوس.

عندما يتوقّف عن العمل، سواء في الليل أو النهار، يروح يمشي ويُفكّر، وخصوصاً في الليل. ولذا، اعتبر أن يوماً من ٢٤ ساعة ضيّق تماماً. ووصلت تجربته مع ذلك الانتظام المُصطنع إلى نهايتها عندما قرّر انه لا يستطيع تحمّل الاستيقاظ تحت شمس غاربة، كما حدث تكراراً في الأيام الأخيرة. وفي عمر الـ ٢٩ سنة، عُدّ فايينبوم عالِم العلماء، واعتبر مرجعاً فورياً للاختصاصيين يستشيرونه في المعضلات التي لا يجدون لها حلاً، شرط ان يعثروا عليه أوّلاً! وذات يوم، وصل إلى المختبر في اللحظة التي همّ مديره، هارولد أغنيو، بمغادرته. تميّز أغنيو بشخصيته القوية، وقد تتلمذ على يد أوبنّهايمر. وركب طائرة «إينولا غاي» حين ألقيت القنبلة التي صنعها هذا المختبر، على هيروشيما. «لقد أيقنت أنك رجل شديد الذكاء»، قال أغنيو لفايينبوم، ثم أكمل: «لماذا لا تستخدم ذكاءك في حلّ مسألة اندماج أشعة الليزر؟» لم يكن سؤالاً عبثياً. فقد وصل فايينبوم إلى حدّ دفع بأصدقائه إلى السؤال عن قدرته على تحقيق شيء خاص به.

فبقدر وَلعه بأن يستنبط فوراً، وكأنما بفعل السحر، إجابات عن أسئلة زملائه من

العلماء، لم يُبدِ اهتماماً بتكريس بحوثه لحل أي مشكلة علمية ذات طابع عملي. لقد انهمك بالتفكير في الاضطراب في حركة السوائل والغازات. وهام فكره وراء صورة الزمن: هل يسير كنهر من البداية إلى النهاية، أم انه كميات منفصلة تتتالى، كما تتتابع الصور المستقلة لتصنع، وهماً، فيلم الزمن الكوني المُتّصِل؟ وغاص في قدرة العين على رؤية أشكال وألوان مُنسجمة، في كون يعلم الفيزيائيون أنه يشبه المِشكال: تلك القطع من الزجاج المُلوّن التي تتحرك باستمرار فتعكس أشكالاً هندسية وألواناً متغيّرة باستمرار؟ فَكَّر في الغيوم التي راقبها تكراراً من نافذة الطائرة (وقد حُرِم من ذلك لاحقاً، عام ١٩٧٥، عندما توقّفت الحكومة عن دفع تكاليف سفره)، أو أثناء عبورها فوق التلال القريبة من المختبر.

في البلدات الجبلية من الغرب الأميركي، تُشبه الغيوم غالباً غشاوة صفيقة ومتقطعة تطير على علوٍ منخفض.

وفي مختبر «لوس آلموس»، تطير الغيوم قريباً من قمم براكين خامدة، في تشكيلات عشوائية. لكنها تبدو غير عشوائية أيضاً، إذ تتسمَّر أحياناً كأسنان الأشواك أو تعبر في تشكيلات قطنية تشبه مظهر المُخ. وفي الظهيرات العاصفة، حين تهتز السماء بأثر الكهرباء وبروقها، ترتفع الغيوم بعيداً فتعترض طريق الضوء وتُكَسّره، كما تهمي بالبروق، فتصنع مشهدية تتحدى عالَم الفيزياء. تُجسّد الغيوم ملمحاً من الطبيعة تجنّبه معظم علماء الفيزياء، لانه ملمحٌ مُشوّش وحافل بالتفاصيل، مُنَظّم ولا يمكن توقّع تصرفاته. فَكَّر فايينبوم في تلك الأشياء بهدوء، ولكن من دون جدوى ظاهرة.

وبالنسبة إلى عالم فيزياء، يمثّل حلّ معضلة اندماج أشعة الليزر تحدياً مُجدياً. من المفيد التفكير علمياً في ألوان تلك الأشعة ومُكوّناتها الدقيقة وجزيئاتها، ومن المُجدي أيضاً التأمل في أصل الكون. أما التأمل في الغيوم، فمسألة في غير طائل.

وكالكثير من النابهين علمياً، درج فايينبوم على استعمال مصطلحات خاصة، لتصنيف درجة الصعوبة في المسائل الفيزيائية.

فإذا استعمل عبارة «إنه شيء واضح»، فذلك يعني أن الحلّ في متناول من يسأله من العلماء، شرط أن يُثابر على الحسابات المُعقّدة. أما عبارة «ليس واضحاً»، فتصف نوعاً من المسائل ربما أدى حلّها إلى الفوز بجائزة نوبل. أما بالنسبة إلى أشد المسائل غموضاً وأكثرها استعصاء على الحلّ، فقد ألّف الفيزيائيون الإشارة إليها بمصطلح «عميق». وعام ١٩٧٥، لم يعلم سوى قلة من الأصدقاء أن فايينبوم مكبّ على مسألة من النوع العميق: الفوضى (كايوس).

تبتدئ نظرية الفوضى (كايوس) من الحدود التي يتوقّف عندها العلم التقليدي ويعجز. فمنذ شرع العلم في حلّ ألغاز الكون، عانى دوماً من الجهل بشأن ظاهرة الاضطراب، مثل تقلّبات المناخ، وحركة أمواج البحر، والتقلّبات في الأنواع الحيّة وأعدادها، والتذبذب في عمل القلب والدماغ. إن الجانب غير المُنظّم من الطبيعة، غير المنسجم وغير المتناسق والمفاجئ والانقلابي، أعجز العلم دوماً.

وشرعت تلك الصورة في التغيّر تدريجاً في سبعينات القرن العشرين، عندما همّت كوكبة من العلماء الأميركيين والأوروبيين للاهتمام بأمر الاضطراب وفوضاه. وتألّفت تلك الكوكبة من علماء في الفيزياء والرياضيات والبيولوجيا والكيمياء، سَعوا للإمساك بالخيوط التي تجمع ظواهر الفوضى كلها.

لقد عثر اختصاصيو الفيزيولوجيا (علم وظائف أعضاء الجسم) على درجة هائلة من التناسق في الاضطراب الذي يصيب القلب الإنساني ويوقف عمله على نحو مفاجئ، والذي يعتبر أيضاً سبباً رئيسياً للوفيات بشرياً. ودرس اختصاصيو البيئة التقلّب في أعداد الفراش الغجري. وغاص الاقتصاديون رجوعاً في تاريخ أسعار الأسهم، وأخضعوها لنمط جديد من التحليل. لقد أنتجت تلك البحوث رؤى جديدة دلّت على إمكان تغيير النظرة إلى العالم الطبيعي، بما في ذلك أشكال الغيوم وبروقها، والشبكات المتداخلة من الشعيرات الدموية، وتجمّعات النجوم في المجرّات.

وانضمّ ميتشل فايينبوم إلى تلك الكوكبة من العلماء، التي لا يعرف بعضها بعضاً، إذ

شرع في سبر غور نظرية عن الفوضى في «لوس آلموس». وفي الوقت عينه، استطاع عالم رياضيات في جامعة بيركلي في ولاية كاليفورنيا، تكوين مجموعة صغيرة وجّهت جهودها لتقصّي عمل «النُظُم الديناميكية». كما فكّرت مجموعة من علماء البيولوجيا في جامعة برنستون في نشر نداء مؤثر إلى العلماء كافة، لكي يجدّوا في درس السلوك المُدهش والمُعقّد للنماذج التي تبدو بسيطة. وانهمك اختصاصيٌّ في علم الهندسة، من شركة «آي بي أم» للكومبيوتر، في تأمل عالم جديد رسمته مجموعة غير مألوفة من الأشكال الهندسية (متعرجة ومتداخلة ومترابطة ومتفككة وملتوية ومُتكسّرة ومتكررة ومتغيّرة)، فرأى أنها تُعبّر عن مبدأ سائد في الطبيعة. وزعم اختصاصيٌّ فرنسي في الرياضيات الفيزيائية أن الاضطراب في حركة السوائل يمكن تفسيره عبر مفهوم مجرد ومُعقّد، أطلق عليه اسم الجاذب الغرائبي.

وبعد عشر سنوات من تلك الجهود، صار مصطلح الفوضى (الكايوس) اختصاراً لحركة متصاعدة أعادت صوغ المؤسسة العلمية عالمياً. تكاثرت منتديات الكايوس ومجلاته. وخصّص المسؤولون عن التمويل، في الجيش الأميركي و«سي آي إيه» ووزارة الطاقة، أموالاً متعاظمة للبحوث عن نظرية الفوضى. وفي الجامعات ومراكز البحث، شُغلَت أعداد متزايدة من الباحثين في فهم الكايوس، وجعلته في الموضع الأول من اهتمامها، مهما كانت طبيعة اختصاصاتها الأكاديمية. وفي «لوس آلموس»، أُسّس «مركز الدراسات عن الظواهر غير المُنظّمة» لكي يُنَسّق بين العمل على نظرية الكايوس ومجموعة من البحوث المتنوعة. وظهرت مراكز مُشابهة في الجامعات الأميركية الكبرى كلها.

لقد وَلّدَت نظرية الكايوس تقنيات خاصة في علوم الكومبيوتر، وأنواعاً خاصة من الصور الغرافيكية (البيانية) التي بات في مقدورها التقاط التركيب الحسّاس الذي تنشأ منه الظواهر المُعقّدة. وسرعان ما صاغ علم الكايوس لغة مصطلحاته مثل «الأشكال التكرارية المُتغيّرة» (فراكتال Fractal)، والتفرّعات والتوسّطات والفترات الدورية والمنشفة المطوية وخرائط أشرطة المعكرونة الرفيعة والتحوّل إلى هيئة مختلفة.

لقد وصفت تلك المصطلحات أنماطاً جديدة من الحركة، تماماً مثلما اكتشف العلماء في تلك الفترة أيضاً الكوارك واعتبروه نوعاً جديداً من مُكوّنات الذرة، وأنه أصغر جسيماتها. وبالنسبة إلى بعض الفيزيائيين، تُجسّد نظرية الفوضى علماً عن العمليات المتحركة أكثر مما تصلح وصفاً للحالات الثابتة، وأنها علم ما قد يتحقق وما قد يكون، أكثر ممّا هي علم الكائن والمُتحقق فعلاً. بدا الكايوس وكأنه في كل مكان. يصف الكايوس ظواهر مثل: عمود الدخان الذي يرتفع من رأس سيجارة مشتعلة، وعَلَم يخفق في الريح، وصنبور يرشح نقطة نقطة بطريقة غير ثابتة، واهتزاز الطائرة في الجو، وجريان النفط في الأنابيب. وبغضّ النظر عن الوسط الذي تحدث فيه الظاهرة، بدت نظرية الفوضى وكأنها تستطيع أن تصوغ قوانين مشتركة تربط أنواع الظواهر المُضطربة بعضها ببعض.

وشرعت هذه النظرة في تغيير الأساليب التي يتبعها مديرو شركات التأمين لدى اتخاذ قراراتهم، والمناهج التي يتأمل فيها الفلكيون الكون، والطرق التي يتحدث بها السياسيون عن النزاعات المُفضية إلى الصدامات المسلحة. تَعْبُر نظرية الكايوس الحدود الفاصلة بين الاختصاصات العلمية. وبوصفها نظرية عن الطبيعة الكليّة للنُّظُم، استطاعت أن تجمع مُفكرين من حقول علمية اعتُبرت متباعدة تقليدياً. وبحسب كلمات مسؤول رفيع في الأسطول الأميركي، «قبل ١٥ سنة، هيمنت أزمة على العلم بسبب توزّعه إلى اختصاصات تتفرع منها اختصاصات أخرى... لقد غيّر الكايوس تلك الصورة جذرياً، بحيث سار بالعلم في الاتجاه المُعاكس للتوزّع على الاختصاصات المُجزّأة». وتفرض نظرية الفوضى تحدياً ضخماً على الطرق التقليدية المستقرة علمياً. وتزعم أنها تُفسّر الظواهر المُعقّدة بردّها إلى سلوك ونمط من التصرّف مشترك في ما بينها. وتشارك علماء الكايوس الأولون في حساسيات معيّنة، إذ تشاركوا في امتلاك عين ثاقبة تلتقط النمط، وخصوصاً النمط الذي يُعاود الظهور، ولو مختلفاً قليلاً، عبر مراحل زمنية مستقلة، وتقاطعت ميولهم عند التنبّه للعشوائي والمُعقّد، وللحدود المتعرجة والمتخبّطة، وللقفزات المُفاجئة، تفكّر

المؤمنون بالكايوس (الذين وصفوا أنفسهم بألفاظ مُعتنقي المذاهب الدينية) في الحتمية والارادة الحُرّة، وفي التطوّر، وفي طبيعة الذكاء الواعي. وأحسّوا بأنهم يقلبون ظهر المجن لميل العلماء نحو مبدأ الاختزال الذي يظهر في الميل إلى وصف الظواهر عبر ردّها إلى مكوّناتها الصغيرة (كحال الكوارك والكروموزوم والنيوترون). في حين نظر أنصار الكايوس إلى أنفسهم كمن يبحث عن الصورة الكبيرة الشاملة.

وذهب المتحمّسون لعلم الكايوس إلى القول إن القرن العشرين سيُذكر بسبب ثلاثة أشياء: نظرية النسبية والفيزياء الكمومية ونظرية الكايوس، التي اعتبروها الثورة العلمية الثالثة في تاريخ علم الفيزياء.

فعلى غرار الثورتين اللتين سبقتاها (النسبية والكمومية)، تهجر نظرية الكايوس فيزياء نيوتن وتُمعن في تخطئتها. ويصف أحد العلماء ذلك بالقول: «لقد ضربت نسبية آينشتاين وهم نيوتن عن مكان وزمان مُطلقين، وأطاحت الفيزياء الكمومية حلم نيوتن في التوصّل إلى القياسات الدقيقة الحاسمة، وبدّدت نظرية الكايوس خيال نيوتن (وخصوصاً تلميذه انطوان لابلاس) عن إمكان التوقّع المُحكم والحتمي». ومن بين تلك الثورات الثلاث، تتميّز الكايوس بأنها تتناول العالم المُباشر الذي نراه ونحسّه، وتنظر إلى أشياء على مقياس الانسان. وللمقارنة، تتعامل النسبية مع المقياس الكبير (الكون)، في ما تفكّر الكمومية على المقياس الأصغر (الذرّة ودواخلها). وأما الكايوس، فيتأمل في التجارب اليومية والعادية للبشر. فلوقت طويل، ساد شعور غائم، لم يعبّر عن نفسه دائماً بوضوح، بأن الفيزياء النظرية ابتعدت عن العالم، كما يعرفه الإنسان بالحدس والبداهة المباشرين. لذا، بدت نظرية الفوضى وكأنها عودة إلى ما تركته الفيزياء طويلاً. وقد أطلّت دراساتها الأولى برأسها من هوامش علم الفيزياء في القرن العشرين.

وحينذاك، ساد الانشغال بفيزياء الجُسيمات التي تستكشف أصغر اللبنات التي تُكوّن العالم مع مستويات مرتفعة باستمرار من الطاقة (القنبلة الذريّة نموذجاً)، كما تهتم بالمادة على المقياس الأصغر فالأصغر، وبالوقت الأقصر فالأقصر. وقد أعطت فيزياء الجُسيمات

نظريات عن القوى الأساسية في الطبيعة، وعن أصل الكون. ولم يحل ذلك دون امتعاض بعض علماء الفيزياء الشباب مما غاصت فيه فيزياء الجُسيمات التي بطؤ تقدّمها وغرقت في اجتراح مُسميات للأنواع المُكتشفة من الجُسيمات، مما جعلها جسداً مترهلاً. وتحمّس أولئك الشباب لمجيء الكايوس باعتباره تغييراً أساسياً في مجرى علم الفيزياء. وللمثال، تحدّث ستيفن هوكنغ، الذي يشغل كرسي الفيزياء في كامبريدج، مثل نيوتن قبله، بلسان تلك المجموعة العلمية الشابة، أثناء محاضرة ألقاها عام ١٩٨٠ وعنوانها: «هل دنت نهاية الفيزياء النظرية؟» وأورد فيها: «تعرف الفيزياء القوانين التي تتحكم في ما نختبره في الحياة اليومية...وبفضل تقدّم الفيزياء النظرية، نستطيع استخدام آلات ضخمة وغالية الثمن لنُنفّذ تجارب لا نستطيع التنبؤ بنتائجها سلفاً».

ولاحظ هوكنغ أن فهم قوانين الطبيعة عبر فيزياء الجُسيمات، لا يحمل إجابة عن تطبيق تلك القوانين على أكثر الأشياء بساطة ونُظُمها. إذ يختلف شأن القدرة على التوقّع بحسب السياق. ولا تحمل الأشياء الدلالة عينها عندما ترصد تصادم جُسيم في مُسرّع ذريّ، أو حينما تراقب رقرقة السوائل في حوض الحمام وأحوال الطقس ودماغ الإنسان.

لقد وُصفت الفيزياء النظرية التي تحدّث عنها هوكنغ بالثورة، ونال مُنظّروها جوائز نوبل ومنحاً مالية مغرية. وفي لحظات كثيرة، دنت يدها من «الكأس المُقدّسة» للفيزياء: النظرية الموحّدة الكبرى (التي تَعِد بالجمع بين نظريتي النسبية والكمومية وبايجاد قوانين موحّدة لقوى الطبيعة كلها)، والتي تُسمى أحياناً «نظرية عن كل شيء». لقد تقصّت الفيزياء تطوّر الطاقة والمادة رجوعاً إلى اللحظات الأولى (تُقاس عملياً بملايين السنين) التي تلت ولادة العالم. ولكن، هل شكّلت تلك الفيزياء التي صعدت بقوة بعد القنبلة الذريّة في الحرب العالمية الثانية، ثورة علمية فعلياً، أم أنها مثّلت اشتغالاً قوياً على الأُسس التي أرساها ألبرت آينشتاين ونيلز بور وإيرفنغ شرودنغر وآخرون، في نظريتَيّ الفيزياء، أي النسبية والكمومية؟ لقد غيّرت منجزات تلك الفيزياء، من القنبلة الذريّة إلى الترانزستور، شكل القرن العشرين. ولم يحل ذلك دون سيرها الحثيث نحو آفاق أشد

ضيقاً. ولقد مرّ جيلان من العلماء، بعد الأسماء المذكورة آنفاً التي غيّرت نظرة العالم إلى نفسه عبر نظريات علمية ثورية حقاً. والأرجح أن الفيزياء التي تحدث عنها هوكنغ أنجزت مهمتها، من دون التوصّل إلى إجابة عن أكثر الأسئلة بساطة وجذرية، عن الطبيعة. كيف تبتدئ عملية ظهور الأشكال الحيّة؟ ما هو الاضطراب؟ كيف يمكن صنع نظام في عالم محكوم بالسير نحو التفكك والتشوّش، كما تتوقّع الفيزياء النظرية عبر قوانين الديناميكا الحرارية؟ وفي الوقت نفسه، افترض الفيزيائيون أن أشياء الحياة اليومية والنُّظُم الميكانيكية، مفهومة تماماً. والحال أنها لم تكن كذلك يوماً.

ومع استمرار ثورة الكايوس، وجد أفضل الفيزيائيين أنفسهم مشغولين، ومن دون أدنى حرج، في الخبرات الحياتية اليومية التي تجري على المقياس الإنساني العادي. فعكفوا على درس الغيوم بدل النجوم، وأجروا بحوثاً عن كومبيوتر «ماك» العادي، وليس فقط السوبر ـ كومبيوتر من نوع «كراي». وتضمّنت مقالاتهم الأولى أفكاراً عن تقافز كرة الطاولة، على قدم المساواة مع الشروح المتّصلة بالفيزياء الكمومية.

وبذا، تبيّن أن النُّظُم البسيطة شديدة الصعوبة، من حيث عدم القدرة على التنبؤ بمساراتها. وفي المقابل، ثمة انتظام ينبثق في قلب تلك النُّظُم التي بدا أنها تجمع الفوضى والنظام في الحين نفسه. وتجلّت ضرورة نشوء علم جديد لسد الثغرة بين ما يعرفه العلم عن عمل «شيء مفرد» وما يعلمه عن عمل «الملايين من ذلك الشيء نفسه». وللمثال، ثمة ضرورة لتجسير المعرفة، بين عمل الخلية العصبية، التي يعرف العلماء عنها الكثير، وبين عمل الملايين منها معاً في الدماغ والجهاز العصبي، وكذلك بين جزيء الماء وتياراته. علم ليعبر الجسر الفاصل بين المعرفة عن الشيء المُفرد وبين الكُلي المتألّف من مجموعات من ذلك الشيء عينه.

ثمة مثال آخر. لنراقب فقاقيع الصابون التي تصب في مصرف الحمام، كيف نستطيع معرفة تقارب الفقاعات وتباعدها؟ وتقليدياً، عندما يفكّر الفيزيائيون في الصور المُعقّدة، يميلون إلى تفسيرها بردها إلى أسباب مُعقّدة أيضاً. وعندما يلاحظون أن بعض الأشياء

تسير بصورة عشوائية وغير متوقعة، فإنهم يفسّرون ذلك عبر إضافة عنصر من التشوّش أو الخطأ.

وتغيّرت تلك النظرة في ستينات القرن العشرين، مع زحف نظرية الكايوس، التي سعت إلى صوغ معادلات رياضية بسيطة لكي تشرح مظاهر كبرى وعنيفة مثل الشلالات. ورصدت ظاهرة قوامها أن حدوث تغيّرات بسيطة في المُعطيات الأولية التي تتعامل معها تلك المعادلات، تفضي إلى نتائج هائلة عند الحساب النهائي. وسمّت نظرية الكايوس تلك الظاهرة «الاعتماد الحسّاس على المُعطيات الأولية».

وسرعان ما اشتهرت باسم «أثر جناح الفراشة»، الذي راج أولاً في أوساط خبراء الطقس عبر جملة ـ طارت شهرتها لاحقاً ـ تقول إن رفّة جناح فراشة فوق بيجينغ تستطيع أن تُغيّر نظام العواصف فوق نيويورك.

وعندما تقصّى «ثوّار» الكايوس أصول نظريتهم، وجدوا أنها تتصل بأعمال فكرية عدّة في تاريخ العلم والثقافة. وظلت مقولة «أثر جناح الفراشة» أفضل نقطة انطلاق لهذه الثورة العلمية الجديدة.

أثر جناح الفراشة

«يميل الفيزيائيون للتفكير في أنه يكفيهم قول من نوع:
ها هي الظروف والمُعطيات الأولية، فما الذي سيحدث لاحقاً؟»

ريتشارد فاينمان

سارتْ الشمس في سماء لم تر الغيوم البتة. وكنست الريح أرضاً ملساء كالزجاج. لم يأت الليل البتة، ولا فسح الخريف الطريق أمام الشتاء.

لم تمطر يوماً. بهذه الطريقة يمكن وصف مُحاكاة الطقس في الكومبيوتر الذي استحدثه عالم الفيزياء إدوارد لورنز، حيث تتغير أحواله ببطء، ولكن بثبات. وبدا العالَم، على شاشة الكومبيوتر، وكأنه في أبهة فارس من القرون الوسطى، أو إعلان ترويجي عن كاليفورنيا الجنوبية. ومن نافذته، راقب لورنز الطقس الحقيقي، حيث ينتشر ضباب خفيف في الصباح المُبكّر عبر مباني «معهد ماساشوستس للتقنية»، وتنزلق الغيوم الخفيضة المقبلة من المحيط الأطلسي، على أسطح المنازل. ولم يُشاهد غيم ولا ضباب في المُحاكاة الإلكترونية لحال الطقس. وتألف كومبيوتر لورنز من مجموعات كثيفة من الأنابيب المُفرّغَة والتوصيلات الكهربائية التي احتلت قسماً كبيراً من مكتبه. ودأب الكومبيوتر على إطلاق أزيز مُزعج بصورة مُفاجئة، إضافة إلى توقفاته المُربكة. ولم يمتلك ذاكرة كفيّة، ولا حاز السرعة اللازمة لمُحاكاة الغلاف الجوي للأرض ومحيطاتها، بصورة مُجدية. وعلى رغم ذلك، استطاع لورنز صنع دُمية الطقس الإلكترونية هذه، التي أذهلت زملاءه عام ١٩٦٠.

وفي كل دقيقة، تسجّل تلك الآلة مرور يوم، ثم تطبع بيانات طقسه ورقياً على هيئة سلاسل طويلة من الأرقام. ومن يُجدْ قراءة تلك الأرقام، التي تتألف من تسلسلات طويلة من رقمي صفر وواحد، باستطاعته رؤية الريح الغربية أثناء طيرانها شمالاً ثم غرباً ثم جنوباً ثم شمالاً مُجدداً. وتُدَوِّم الأعاصير لتتجمع ببطء فوق نموذج رقمي عن أرض مثالية. وبحسب شائعة منتشرة، دأب خبراء الطقس الآخرون على التجمّع، بصحبة الطلبة

الموشكين على التخرّج، ليراهنوا على الخطوة التالية في مسار الطقس في «دمية» لورنز. وبطريقة ما، فلا شيء يتكرر بالطريقة عينها مرتين. لقد أحب لورنز الطقس وتقلّباته. وأُعجب بالأنماط التي تظهر وتختفي في الغلاف الجوي، وبالأعاصير والزوابع، التي صنعتها مُعادلات رياضية في الكومبيوتر، ومع ذلك فإنها لا تتكرر بالطريقة نفسها مطلقاً. وعندما يمدّ بصره إلى الغيوم الحقيقية، فإنه يرى فيها نوعاً من التنظيم المُضْمر.

وعند بداية تخصصه في المناخ، لاح للورنز أن عمل العلم في الطقس يشبه تفكيك «عفريت العلبة» بمفك البراغي. وراهناً، صار يتساءل عن قدرة العلم على إدراك السحر الذي يتضمنه الطقس الذي يحمل نكهة من اللاتوقّع تعجز عن وصفها لغة الاحصاءات وحساباتها.

إن معدل الحرارة القصوى يومياً خلال شهر حزيران (يونيو) في جامعة كامبريدج، ولاية ماساشوستس، يبلغ ٧٥ درجة فهرنهايت. يبلغ متوسط عدد الأيام المطيرة في الرياض بالمملكة العربية السعودية، عشرة أيام سنوياً. تلك مجرد إحصاءات. ولا تعكس «حلاوة» الطقس، حيث الأنماط تتبدّل بمرور الوقت، وذلك ما حاول لورنز تصويره في «دمية» الطقس الإلكترونية التي اخترعها على كومبيوتر «رويال ماك بي». ومَهَر في التلاعب بالمناخ الذي رسمه على الكومبيوتر، فاختار ان يُحرّك تبدّلاته وِفق ١٢ قانوناً. ويتشكّل كل قانون من مُعادلات رياضية، تُعبّر عن العلاقة بين الحرارة والضغط، وبين الضغط وسرعة الرياح. وأدرك لورنز أنه يطبّق قوانين نيوتن في الفيزياء، التي تلائم مثلاً صُناع الساعات الميكانيكية فيستخدمونها في صنع آلات تستطيع أن تعمل بصورة تكرارية، وربما إلى الأبد. في الساعات، تتكرر الأشياء نفسها بانتظام ثابت. ويكفي فهم القوانين لكي تستوعب العالم. ولقد صاغ لورنز دميته الإلكترونية عن الطقس، وفقاً لتلك الفلسفة. وبذا، هيمن على الأحوال الافتراضية لمناخ الأرض، في الكومبيوتر، بصورة مُطلقة. واتخذت هيمنته شكل القانون الذي يُحرّك الأشياء. ويصلح لورنز لمهمة الهيمنة تلك، إذ يملك وجه فلاح من الشمال الأميركي، مع عينين مُدهشتين بالتماعاتهما، تُعطي

وجهه ضوء الابتسام الدائم. وقلما تحدّث عن عمله أو عن نفسه، لكنه أجاد فن الإصغاء. وكثيراً ما بدا مستغرقاً كلياً في الحسابات أو الأحلام.

أظهر لورنز حُشرية تجاه الطقس منذ طفولته، إذ اعتاد أن يراقب عن كثب، تقلبات الحرارة العُليا والدُّنيا التي يسجلها ميزان الحرارة خارج منزل أسرته في بلدة «ويست هارفورد» بولاية كونكتيكت. لكنه بدا أكثر ميلاً لقضاء الوقت في حلّ الأحاجي التي تتضمنها كتب الألعاب الرياضية.

وأحياناً، شارك أباه في ابتكار بعض تلك الأحاجي. وصادفا ذات مرّة أحجية صعبة، فاتضح أن لا حل لها. وانتهز والده الفرصة ليُسرّ له بالسر الآتي: من المستطاع دوماً محاولة حلّ مسائل الرياضيات بإظهار أن لا حل لها. وسُرّ لورنز بهذه المعلومة، كما أُعجب لاحقاً بعلم الرياضيات وطابعه المُجرّد بنقاء. وعند تخرجه في جامعة «دارتموث» في العام ١٩٣٨، سمعت أُذناه نداء خفيّاً من علوم الرياضيات. ولكن، تدخلت الحرب العالمية الثانية في مصيره، فدفعته للعمل كمتتبع لأحوال الطقس في «فيالق سلاح الطيران». وبعد نهاية الحرب، قرّر لورنز متابعة اختصاصه في المناخ، موظِّفاً طاقاته النظرية وبراعته في الرياضيات، ليدفع ذلك العلم إلى الأمام قليلاً. وذاع اسمه عندما نشر كتاباً عالج فيه عدداً من المسائل التقليدية، مثل الدورة العامة للمناخ. ودأب على التفكير في تتبع أحوال الطقس.

وبالنسبة للاختصاصيين التقليديين في المناخ، يبدو توقع الطقس وكأنه علم أقل. فقد بدا كأنه عمل مكتبي تنجزه مجموعة من التقنيين الذين يستخدمون حدسهم لكي يتوقعوا أحوال الغد انطلاقاً من متابعة الغيوم وأرقام الآلات.

إنه عمل يتضمّن الكثير من التخمين. وفي مراكز مثل «معهد ماساشوستس للتقنية»، يفضل علماء المناخ المسائل القابلة للحل. وأدرك لورنز أن التنبؤ بالطقس لعوبيّ وصعب، بناء على خبرته أثناء الحرب مع الطيارين، لكنه أضمر أن يحاول التعامل معه عبر مهارته في علم الرياضيات.

وفي ستينات القرن العشرين، لم تكن الثقة وطيدة بين كثير من العلماء والكومبيوتر. ولم تبْد تلك الآلات الحاسبة كأدوات مناسبة للعلوم النظرية. ولذا، بدا صنع نموذج رقمي عن الطقس أمراً غرائبياً، ولكن حان وقته أيضاً. فمنذ قرنين، انتظر متتبعو الطقس ظهور آلة تستطيع أن تُعيد الآلاف من الحسابات، مراراً وتكراراً وبلا كلل ولا خطأ.

وبدا أن الكومبيوتر وحده يستطيع أن يُحقق حلم نيوتن بعالم يسير على طريق مُحتم ومرسوم بدقة، مثل مسارات الكواكب، وقابل للتوقع مثل أوقات الكسوف ومدّ البحر.

ونظرياً، بدا الكومبيوتر في يد علماء المناخ وكأنه نظير القلم والمسطرة الحسابية المُنزلقة (وهي أداة للحساب راجت قبل الحاسبات الالكترونية والكومبيوتر) في يد الفلكيين. فكلاهما أداة دقيقة تستطيع إجراء حسابات صارمة، ويكفي أن تعطيها أرقاماً عن الأوضاع الأولية لتعطي توقعاً حسابياً دقيقاً عما ستؤول إليه الأوضاع تالياً.

ولقد عرف العلماء المُعادلات التي تصف حركة الهواء والماء، مثل معرفتهم بالمعادلات التي تصف حركة الكواكب. ولم يصل الفلكيون إلى مرتبة الكمال في معرفة حركة الكواكب السيّارة في النظام الشمسي، ولن يصلوا إلى تلك المرتبة أبداً في نظام مُثقل بأنواع الجاذبية والأجرام وتداخلاتها. ولكن، يستطيع هؤلاء أن يعطوا حسابات دقيقة عن حركة أجرام النظام الشمسي، إلى حدّ أن الناس نسيت أن تلك الحسابات هي توقّعات أيضاً، كحال التوقعات عن الطقس! فعندما تُسمع عبارة مثل: «سيعود مُذنّب هالي للمرور بعد ٧٦ سنة»، لا يتبادر إلى الأذهان أنها توقّع، بل يُنظر إليها كحساب واقعي.

وفي استطاعة التوقّع الحسابي الصارم والحتمي، أن يُعطي أرقاماً دقيقة عن مسار القنابل والصواريخ، فلماذا يفعل الأمر نفسه مع الرياح والغيوم؟

يُشكّل الطقس شيئاً مُعقداً، لكن تتحكم به القوانين نفسها التي صاغتها فيزياء نيوتن. إذاً، فلربما استطاع كومبيوتر قوي أن يُجسد الذكاء المتفوق، الذي حلم به لابلاس: الفيلسوف وعالم الرياضيات الذي تحمّس لفيزياء نيوتن إلى حدّ لم ينافسه فيه أحد. وقد كتب، ذات مرّة، قائلاً: «إن الذكاء المتفوق في امكانه أن يُطبّق معادلات الحركة عينها على

أضخم أجرام الكون، كما على أصغر الذرّات. وبذا، يستطيع أن يتنبأ بدقة بكل الأشياء الآتية، وبحيث يصبح المستقبل معروفاً لعينيه، مثل الماضي». وفي القرن العشرين، ومع نظرية آينشتاين عن النسبية ومقولة هايزنبرغ عن «مبدأ عدم التيقّن»، باتت مقولات لابلاس مُدّعية، لكن بعض العلماء يميل لمتابعة حلم لابلاس. وبشكل مُضمر، كرّس بعض اختصاصيي القرن العشرين، في البيولوجيا والأعصاب والاقتصاد، جهوداً هائلة للوصول بالعلوم التي تخصصوا فيها، إلى مكوّناتها الأصغر، التي تستجيب للقوانين العلمية المعروفة.

وفي تلك العلوم، بدت الحتمية النيوتنية، على طريقة لابلاس، وكأنها قابلة للتحقّق. والأرجح أن مبتكري الكومبيوتر الأوائل حملوا شيئاً من لابلاس في أنفسهم. وقد تداخل تاريخا التنبؤ والكومبيوتر منذ ابتكر جون فون نيومان آلاته الأولى في «معهد الدراسات المتقدمة» في جامعة برنستون، بولاية نيوجرسي، في خمسينات القرن العشرين.

ولاحظ نيومان أن صُنع نماذج الطقس تمثّل مُهمة مثلى للكومبيوتر.

وفي المقابل، برزت تسوية صغيرة. وبدت هيّنة إلى حدّ أن العلماء تغافلوا عنها، فظلت قابعة في ركن قصيّ في فلسفاتهم. تقضي تلك التسوية بأن القياسات يستحيل أن تكون دقيقة.

وهكذا، بدا أن الصورة الفعلية مختلفة عن الحلم النيوتني بالحسابات الحتمية. ولاح كأن ثلة العلماء التي تلاحق حلم لابلاس تُضمر شعاراً ثانياً يقول: انطلاقاً من حساب تقريبي عن مُعطيات الأوضاع الأولية، يستطيع الفهم الدقيق للقانون الطبيعي أن يصل إلى حساب تقريبي عن سلوك النُظُم موضع الدراسة. إنه افتراض أساسي في قلب العلم. وبحسب كلمات أحد الأكاديميين: «يتجسّد جوهر العلم الغربي في افتراض أنه يمكن تجاهل حركة سقوط أوراق الشجر في كوكب ناءٍ في المجرة، عند احتساب حركة كرة على طاولة البلياردو. نستطيع إغفال التأثيرات الواهية. ثمة تضافر في عمل الأشياء، ولذا لا تتجمع التأثيرات الهيّنة لتولّد تأثيراً قوياً». وتقليدياً، وجد الإيمان بمبدأ التقريب والتضافر ما يُبرره، وأثبت نجاعته. إن خطأً هيّناً في حساب مسار المُذنّب هالي عند العام

١٩١٠، لن يسبب سوى خطأ ضئيل في توقع ظهوره في العام ١٩٨٦، وسيبقى ذلك الخطأ ضئيلاً ملايين السنين. وتعتمد الكومبيوترات على المبدأ عينه أثناء توجيهها سفن الفضاء: الدقة التقريبية في الحسابات الداخلة إلى الكومبيوتر تُعطي دقة تقريبية في النتائج. ويرتكز عمل المُحللين الاقتصاديين على المبدأ عينه، لكنهم يحرزون نجاحاً أقل. وسار روّاد علم المناخ على المبدأ عينه بالنسبة للتنبؤ بالطقس.

وبفضل كومبيوتره البدائي، أوصل لورنز المناخ إلى أكثر عناصره أساسية.

وعلى الرغم من ذلك، شرعت قياسات الرياح والحرارة في نموذج لورنز تميل إلى تقليد الطقس «الحقيقي». وابتهج لورنز بذلك، لأنه ينسجم مع خبرته عن الطقس ومتغيّراته، وخصوصاً مع حدسه بأن تلك التقلّبات تُكرّر نفسها، وتظهر فيها فجأة أنماط مألوفة، كأن ترتفع الحرارة وتسقط، فتتأرجح الرياح بين الشمال والجنوب.

وقرر أن هذه الملاحظة تصلح كنوع من القانون الذي يستطيع مراقبو الطقس الركون إليه. ولكنه سرعان ما لاحظ شيئاً آخر: التكرارات لا تأتي على الشكل نفسه كلياً. يوجد نمط ولكن مع اضطراب. إنه نظام اللانظام.

ولإيضاح الأنماط، ابتكر لورنز رسوماً بيانية بدائية. وبدلاً من طباعة السلاسل المعهودة من الأرقام، صار الكومبيوتر يطبع التقلبات على صورة مزيج من الفراغ والحرف «آي» باللغة الإنكليزية. واستخدم تلك الرسوم البيانية لملاحقة متغيّرات الطقس، الواحد تلو الاخر. لنقل إن الكومبيوتر يُتابع اتجاه الريح، فيلاحظ لورنز أن الحرف «آي» يسير نزولاً وصعوداً في خطوط متماوجة.

إن قمم التموجات وقيعانها تُجسّد الطريقة التي تسير فيها الرياح الغربية، متأرجحة جنوباً وشمالاً، عبر القارة الأميركية. وفي منحى النظام، تظهر دورات وكأنها تتكرر المرّة تلو المرّة، لكنها لا تتطابق مع نفسها البتة. وأعطى ذلك التكرار الذي يتغيّر دوماً سحراً مُنوّماً لخطوط تلك الرسوم البيانية. وتدريجاً، شرعت الخطوط في الكشف عن أسرارها لعيني لورنز.

وفي يوم من شتاء العام ١٩٦١، أراد لورنز أن يتتبع أحد الأنماط على مدى زمني أوسع. واصطنع لذلك طريقة مختصرة. فقد أدخل بنفسه المُعطيات عن الأوضاع الأولية عن الفترة السابقة إلى عقل الكومبيوتر، مستخدماً لوحة المفاتيح في طباعة الأرقام التي تُمثّل الأوضاع الأولية التي يجب على الكومبيوتر درسها والتنبؤ بالطقس اللاحق بناء عليها. ثمّ خرج ليتنزه بعيداً من ضوضاء تلك الآلة. وشرب فنجاناً من القهوة. وعاد بعد ساعة، ليجد مفاجأة مُدهشة. وجد شيئاً غير متوقّع، لكنه شكّل نقطة الانطلاق لعلم جديد.

لقد توقع أن تُكرر الرسوم البيانية الأشكال التي اتخذتها سابقاً، لأن البرنامج لم يتغيَّر، لذا فقد توقع أن يُعطي النتيجة نفسها. ومثلاً، لنفترض أنه أدخل إلى الكومبيوتر أرقام ٤ آذار (مارس) من العام الماضي، باعتبارها الأوضاع الأولية التي يجب الانطلاق منها، فقد توقع أن يُعطيه الكومبيوتر الرسوم التي ظهرت في ٥ آذار (مارس)، أي أن يُكرّر النمط نفسه تماماً. ولم يحصل ذلك، بل إن الرسوم البيانية عن الطقس في الأشهر التالية، أصبحت شديدة الاختلاف عما كانته. لقد اختفى التكرار كلياً، بدل أن يُكرّر نفسه كلياً! وفي البداية، ظن لورنز أن خطأ ما حدث في جهاز الكومبيوتر. ولم يكن الأمر كذلك. وسرعان ما التمعت في ذهنه خلاصة مُهمة. ليس العيب في الكومبيوتر، الذي ظلّ أميناً لبرامجه، بل تكمن العلّة في الأرقام التي أدخلها بنفسه إلى الحاسوب. إذ يستطيع «رويال ماك بي» أن يحفظ الأرقام لست خانات بعد فاصلة الكسور العشرية. ولكن، عندما يُخرج ذلك الكومبيوتر توقعاته مطبوعة ورقياً، فإنه يكتبها مستخدماً ثلاث خانات بعد فاصلة الكسور العشرية، وذلك لتوفير مساحة الطباعة على الورق. إذاً، فإن ما أدخله لورنز هو الأرقام التقريبية التي تُمثّل أحوال الطقس، ظناً منه أن الفرق هيّن، ومقداره كسر من الألف، إلى حد أنه لا يُحدث فرقاً مُهماً. وثبت خطأ هذا الافتراض، وعلى الرغم من منطقيته. وقلما تستطيع الآلات الحقيقية لرصد الطقس الوصول إلى دقة من نوع كسر في الألف. وقد استخدم كومبيوتر «رويال ماك بي» برنامجاً تقليدياً، يستند إلى نظام من المُعادلات الحتمية. فإذا أُعطي المعطيات عينها عن الأوضاع الأولية، فإنه يُكرّر استنتاجاته

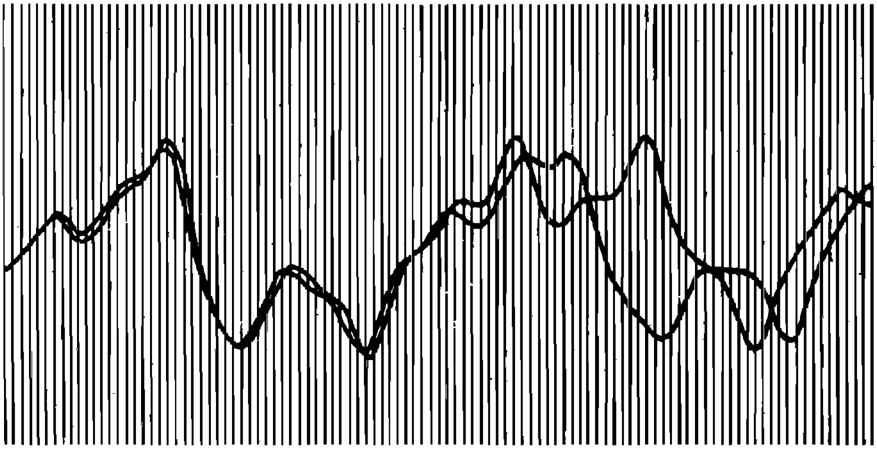
ذاتها. وإذا حدث تغيير بسيط وواهٍ في المعطيات عن الأوضاع الأولية، فمن المفترض ألا يحدث سوى تغيير طفيف في التنبؤ عن الأحوال التالية للطقس. إن نسمات بسيطة من الهواء، يُفترض ألا تُؤدي لغير تبدّل طفيف في الصورة الكبيرة لنظام الرياح الكبرى.

لكن التجربة مع نظام المُعادلات في كومبيوتر الطقس الذي اخترعه لورنز، أثبتت كذب تلك الافتراضات، فأدّت التغييرات البسيطة وغير الملحوظة إلى نتائج كارثية.

وقرر أن يتمعن في الفرق الذي أظهره الكومبيوتر، بين نمطين متقاربين من الطقس، بمعنى أن لا يفرّقهما سوى فروق بسيطة في الأوضاع الأولية. ونسخ الخطوط البيانية على ورق شفّاف، ووضع الواحد فوق الآخر. في البداية، كانا مُتطابقين، ثم ظهر فرق بسيط، إذ تأخر أحدهما بمقدار لا يزيد على مقدار شعرة. ومع الدورة التالية، ظهر فرق واضح بين قمتي الرسمين البيانيين. وبعد بضع دورات، تلاشى كل شبه بينهما.

لم يزد الأمر على ارتجاف في كومبيوتر بطيء. وكان في إمكان لورنز الركون إلى فرضية وجود خطأ في عمل آلته، لأن الفرق بدا بسيطاً. ولم يكن خلط كلورين مع الصوديوم ليحصل على الملح، فخرجت النتيجة ذهباً! ولكنه فرق مهم. وأحسّ لورنز بفرحة، لم تُصبح مُفهومة فعلياً إلا لاحقاً، لأن شيئاً ما خرج عن التفكير النمطي وفلسفته المهيمنة. ومن شأن خروج كهذا إحداث آثار مذهلة. لقد مثّلت مُعادلات الكومبيوتر ما يحدث في أحوال الطقس على الأرض بصورة تقريبية، ولذا فقد أدرك لورنز أن الاهتزاز في حتمية التوقّع قريب من جوهر ما يحدث في المناخ الحقيقي. وفهم منذ ذاك، ان توقّع الطقس لفترات طويلة، هو جهد محكوم بالفشل.

وفي ما بعد، صرّح لورنز: «لم نكن نفلح فعلياً في التنبؤ الطويل الأمد بأحوال المناخ، وقد بات لدينا تفسير لذلك... أظن أن السبب وراء الاعتقاد الشائع بأن من الممكن التنبؤ بأحوال الطقس وتوقعها، ولفترات طويلة؛ يكمن في وجود ظواهر فيزيائية ملموسة يستطيع العلماء التنبؤ بشأن مسارها المستقبلي. ينطبق ذلك على الكسوف، الذي يتضمن تفاعلاً مُعقّداً بين الأرض والشمس والقمر؛ الذي تتخذ التنبؤات بشأنه طابع



كيفية اختلاف نمطين من الطقس: انطلاقاً من الأوضاع الأولية نفسها تقريباً، رأى إدوارد لورنز أن كومبيوتره رسم نمطين مختلفين عن أحوال الطقس، وأنهما يزدادان تباعداً بمرور الوقت. (صورة مما طبعه كومبيوتر لورنز في العام ١٩٦١).

الحقيقة العلمية. ويمكن إعطاء تنبؤات دقيقة نسبياً عن أحوال المدّ البحري. وهنا يأتي السؤال: لماذا يمكن توقع أحوال المدّ البحري وليس الطقس، وعلى الرغم من الشبه بين الظاهرتين؟ أعتقد بأن السبب هو أن المدّ البحري يتضمن قسماً دورياً قابلاً للتنبؤ، أما الشيء غير القابل للتنبؤ، فإنه صغير بحيث لا يثير الكثير من الانتباه إلا عندما يُصبح لافتاً، مثل هبوب عاصفة مُفاجئة. بالنسبة إلى الطقس، فإن القسم غير القابل للتنبؤ هو الأكبر. ومن تجربتي معه توصلت إلى أن الأنظمة الديناميكية التي لا تعمل بانتظام دوري، لا يمكن التنبؤ بأحوالها مطلقاً».

ساد في الخمسينات والستينات من القرن العشرين تفاؤل غير واقعي بالقدرة على التنبؤ بأحوال الطقس وتوقّعها. وامتلأت الصحف والمجلات بالآمال في ظهور علم للمناخ، لا يكتفي بتوقع أحوال الطقس، بل يسيطر عليه أيضاً. وحينذاك، نمت تكنولوجيتان بقوة: الكومبيوتر الرقمي والأقمار الاصطناعية. ووضع برنامج دولي للاستفادة منهما اسمه «برنامج البحوث عن المناخ». وسادت فكرة تبشّر بتحرر الانسان من

تقلّبات الطقس، وبقدرته على الإمساك بزمام متغيراته أيضاً، وبأن تستطيع الطائرات نشر الغيوم وتبديدها، وبأن يتوصل العلماء لمعرفة تكفل صُنع المطر والصحو.

والأرجح أن شيوع تلك الفكرة يرجع إلى العالِم فون نيومان، الذي صمّم أول كومبيوتر يتضمن برامج دقيقة لتحليل أحوال الطقس والتوصّل للسيطرة عليها. وأحاط نفسه بنخْبة من علماء المناخ، كما نشر مجموعة من الأفكار الأخّاذة في أوساط علم الفيزياء. لم تكن أفعاله عبثاً، بل استند تفاؤله المُفرط إلى معطيات في علم الرياضيات. فقد لاحظ فون نيومان أن النظام الديناميكي المُعقّد يحتوي على مجموعة من نقاط عدم الاستقرار.

وتُمثّل تلك النقاط مواضع حساسة بحيث أن تأثيراً طفيفاً عليها، يولّد آثاراً كبيرة.

تشبه نقطة عدم الاستقرار كرة موضوعة، بتوازن دقيق، على رأس هرم، بحيث تقدر دفعة بسيطة على دفعها للتدحرج نزولاً عبر أي من جانبيّ الهرم. وتخيّل نيومان أنه، وبفضل كومبيوتر قوي، يستطيع العلماء احتساب المعادلات التي تتحكم بحركة السوائل خلال فترة زمنية معينة، ثم تأتي لجنة من علماء المناخ فتُرسل طائرات لصنع الغيوم أو نشر الأدخنة، بحيث ينقلب الطقس ويسير بحسب ما يشتهيه العلماء. لنتذكر أيضاً أن السوائل تملأ الهواء (الرطوبة)، وكذلك فبالنسبة إلى علم الفيزياء يشبه الهواء الماء في كثير من الصفات، ولذا يُشار اليهما كوسط سائل. ولكن الخيال العلمي لنيومان لم يتنبه إلى الكايوس، حيث عدم الاستقرار منتشر في كل نقطة من النظام.

وفي ثمانينات القرن العشرين، كرّست مؤسسة علمية كبيرة نفسها لتحويل الخيال العلمي لنيومان إلى حقيقة عملية. والتأمت ثلة من أبرز علماء المناخ الأميركيين في مبنى حصين في ضاحية ميريلاند، القريبة من خط الطُرق السريعة لواشنطن. وحظيت المجموعة بدعم شبكة من الرادارات وأجهزة الاستشعار، التي ملأت سطح ذلك المبنى.

ووُضع بين أيديهم كومبيوتر خارق (سوبر كومبيوتر)، يحتوي برنامجاً لمُحاكاة الطقس، يُشبه دمية الطقس التي ابتكرها لورنز لكنه أكثر تطوراً وتعقيداً. فمثلاً، يُجري

كومبيوتر «رويال ماك بي» ستين عملية ضرب في الثانية، في حين تُقاس سرعة عمل سوبر كومبيوتر «كونترول داتا سايبر ٢٠٥» بالميغافلوب بايت (الفلوب بايت تساوي تريليون بايت)، ما يعني قدرته على التعامل مع ملايين العمليات في الثانية. وفيما عمل كومبيوتر لورنز عبر ١٢ مُعادلة رياضية، ارتكز نموذج الطقس في «كونترول داتا سايبر ٢٠٥» إلى نصف ملْيون مُعادلة. وبذا، استطاع أن يفهم دخول الحرارة إلى الهواء وخروجها منه، بالترافق مع تكثّف الرطوبة وتبخّرها. وأعطت الجبال الرقمية في الكومبيوتر شكلاً للرياح الإلكترونية فيه.

وصبّت في «كونترول داتا سايبر ٢٠٥» معلومات من مختلف الأُمم، ومن الطائرات والأقمار الإصطناعية والسفن. وأصبح «المركز الوطني (الاميركي) للمناخ» ثاني أفضل مصدر للتوقعات عن الطقس في العالم.

وصدرت أفضل توقعات المناخ عالمياً من جامعة «ريدنغ» الصغيرة في إنكلترا، التي لا تبعد عن لندن سوى مسافة ساعة بالسيارة، حيث مقر «المركز الأوروبي لتوقعات الطقس على المدى المتوسط». واحتل المركز مبنى متواضعاً تُظلله الأشجار، وتُعَبِّر واجهته عن ذائقة حديثة، إذ تمزج بين الحجر والزجاج بالأسلوب الشائع في مباني الأمم المتحدة. وقد شيد في غرّة الحماسة للسوق الأوروبية المشتركة، فعمدت دول تلك القارة إلى رفده بأفضل الأدمغة المتخصصة في المناخ. وأرجع الأوروبيون نجاح مركزهم إلى الأعمار الشابة للعاملين فيه، وإلى سوبر كومبيوتر أوروبي من نوع «كراي»، بدا دوماً أكثر تفوقاً من نظيره الأميركي.

لقد افتتح الطقس عهد استعمال الكومبيوتر لبناء نماذج رقمية تُحاكي النُظُم المُعقّدة. واستُخدمت تقنيات النَمْذجة الإلكترونية في علوم شتى، شملت الفيزياء وعلم الاجتماع.

وساد أمل بأنها قد تُساعد في التوصّل إلى طريقة للتنبؤ بكل شيء: من تحرك السوائل حول ألواح دفّاش القوارب إلى الحراك الهائل للأموال في الاقتصادات الكُبرى. وفي

ثمانينات القرن العشرين وتسعيناته، اهتم العلماء بصنع نماذج كومبيوتر لمحاكاة حركة الاقتصاد العالمي، وبالتالي التنبؤ بتقلباتها، قدر اهتمامهم بالنماذج الرقمية عن الطقس. بل ظهر تشابه بين هذين النوعين اللذين عملا عبر شبكات مُعقّدة، وشبه اعتباطية، من المعادلات الرياضية التي يُفترض أنها تتولى تحويل المعطيات عن الأوضاع الأولية، سواء في الضغط الجوي أو الموارد المالية، إلى مُحاكاة رقمية عن الأحوال المستقبلية.

وأمِل مبرمجو الكومبيوتر أن تأتي نتائج نماذجهم غير بعيدة كثيراً عن الواقع، وألا تُحرِّفها الافتراضات التبسيطية التي لا يمكن تجنبها في خضم عمل ضخم من هذا النوع. وعندما يصل نموذج معين إلى نتيجة خاطئة بشكل كبير، مثل توقّع فيضان في الصحراء الكبرى أو ارتفاع الفائدة فجأة بمقدار ثلاثة أضعاف، يعمد المُبرمجون إلى إعادة النظر في معادلاتهم لإعادة النموذج إلى التوقعات المقبولة. وعملياً، أثبتت النماذج الاقتصادية عدم قدرتها على رؤية التقلبات المستقبلية، لكن كثيرين تصرفوا كمن يُصدّق تلك النتائج، على رغم معرفتهم بعكس ذلك. وصيغت تنبؤات عن البطالة أو النمو الاقتصادي، بدقة كسر في الألف. ودفعت حكومات ومؤسسات مالية أموالاً للحصول على تلك التنبؤات، بل عملت بوحيها، ربما لغياب البديل الأفضل. ولعلها عرفت أن مؤشرات غائمة مثل «ثقة المستهلك» ليست بمثل دقة «درجة الرطوبة»، وأنه لا توجد معادلات رياضية لوصف الموضة والسياسة.

وفي المقابل، تَعْرِف قلة من الناس صعوبة صنع النماذج على الكومبيوتر، حتى في حال توافر معلومات موثوق بها، وحتى حين يتعلق الأمر بنموذج عن ظاهرة فيزيائية ملموسة مثل الطقس وتقلباته.

وقد نجحت نماذج الكومبيوتر في تغيير التنبؤ بالطقس من فن إلى علم. وأشارت تقويمات «المركز الأوروبي» في «ريدنغ» إلى أن العالم يوفر ملايين الدولارات نتيجة المعلومات التي يُعطيها التنبؤ بأحوال الطقس، حتى لو غابت عنها الدقة التامة. وكذلك شدّدت على أن التنبؤ بالطقس لمدة تزيد على يومين أو ثلاثة، هو

أمر تخميني. وإذا زادت تلك المدّة عينها عن ستة أيام أو سبعة، فإن التنبؤ بأحوال الطقس يفقد قيمته.

يرجع السبب في ذلك إلى أثر جناح الفراشة. إذ تستطيع عناصر صغيرة نسبياً من الطقس أن تُفقد أفضل التنبؤات عن المناخ قيمتها. إذ تتضاعف الأخطاء والأشياء غير المتوقعة، وتتجمع آثارها وتتعاضد عبر سلسلة من الاضطرابات، لتتحوّل من عناصر محلية صغيرة، إلى حراك يشمل القارات ويظهر لعيون الأقمار الإصطناعية.

تعمل نماذج المناخ عبر سلسلة من النقاط التي تفصلها مسافة تقارب ١٢٠ كيلومتراً. وعلى الرغم من ذلك، يتضمن كثير من المعطيات الأولية تخمينات عدّة، لأن محطات الرصد الأرضية والأقمار الإصطناعية، لا يمكنها رؤية كل شيء. وحتى لو غُطّيت الأرض بالمجسّات التي لا يبعد بعضها عن بعض سوى مسافة قدم، ولو كُدست بشكل مماثل عبر الغلاف الجوي؛ وحتى لو أعطى كل مجسّ قياسات دقيقة عن الحرارة والرطوبة والضغط وغيرها؛ ثم تولى سوبر كومبيوتر جمع تلك المُعطيات كلها، فإنه لن يفلح في توقع إذا ما كانت بلدة برنستون في نيوجيرسي، ستشهد صباحاً شامساً أم ماطراً، بعد شهر من الآن! فعند الظهيرة، ستُخفي المسافات الصغيرة بين المجسات بعض التقلّبات البسيطة، وبذا لن يعلم بها الكومبيوتر. وبعد دقيقة، تصبح تلك التقلّبات أخطاء صغيرة على مسافة قدم. وسرعان ما تتضاعف تلك الأخطاء على كل عشر أقدام، وهكذا دواليك.

وبالنسبة للمتمرسين في علم المناخ، فإن هذه الأمور تسير عكس الحدس البسيط. لقد عُرف روبرت وايت، من «معهد ماساشوستس للتقنية» بصداقته المديدة مع لورنز. وترأس لاحقاً إدارة «المعهد الوطني (الأميركي) للمحيطات والغلاف الجوي» (الذي يُشتهر باسمه المختصر «ناوا»). وأخبره لورنز عن أثر جناح الفراشة ومدلولاته البعيدة المدى بالنسبة للقدرة على التنبؤ. وردّ عليه وايت بإجابة من وحي أفكار نيومان: «التنبؤ لا شيء... بل إنها السيطرة على الطقس».

وقصد وايت قول إن تلك التقلّبات البسيطة تقع ضمن السيطرة الإنسانية، لذا يمكن

التحكّم بها لدفع التقلبات الكبرى في المناخ في الاتجاه المأمول. ورأى لورنز الأمر بشكل مختلف. صحيح أنه يمكن التأثير في أحوال الطقس بمعنى إيصاله إلى محل يختلف عن النقطة التي يتجه للوصول اليها. لكن، كيف نعرف تلك النقطة أصلاً؟ يُشبه ذلك أن تخلط أوراق لعب مختلطة أصلاً، فتعرف أن ما فعلته غيّر من حظوظك، لكن ما أدراك ما كانت حظوظك بالأصل؟

جاء اكتشاف لورنز على هيئة مصادفة. وفيها شيء مما ألفه العلم منذ أن قفز أرخميدس من مغطس حمامه صائحاً: «وجدتها... وجدتها». لم يكن لورنز من النوع الميّال لمثل ذلك الصياح. فقد أوصلته المصادفة إلى حيث عمل طويلاً، ولم تكن مُصادفة فعلياً، كالحال مع «المُصادفات» العلمية.

ولذا، شرع في تقصّي نتائج اكتشافه عبر محاولة تصوّر ما الذي يعنيه بالنسبة للطريقة التي يفهم فيها العلم حركة السوائل من كل نوع. لو أنه اكتفى بملاحظة أثر جناح الفراشة بحد ذاته، لما أنجز سوى التشديد على أهمية العناصر العشوائية. لكنه تَفَكّر في شيء أبعد من العشوائية الكامنة لنموذجه عن الطقس. لقد رأى تركيباً هندسياً مُرهفاً مُتخفياً على هيئة العشوائية. ونبش لورنز مهاراته الأصيلة في الرياضيات، فصار كمن يعيش حياة مزدوجة، إحداهما للطقس والأخرى للرياضيات. وأخذ في كتابة تجاربه عن الطقس في ورقتين مختلفتين، تتحدث إحداهما بلغة التنبؤات المناخية، وتستعمل الأخرى لغة الرياضيات المُجرّدة. واستغرق في استنباط المعادلات الرياضية للأنظمة التي لا تعرف حالاً من الاستقرار، والتي تُكرّر نفسها دائماً، لكن بصورة مختلفة في كل مرّة. إنها الأنظمة غير الدورية، التي يُعطي الطقس وأحواله نموذجاً منها. وتمتلئ الطبيعة بالأمثلة عن تلك الأنظمة من التكرار المُتغيّر واللادوري، كحال الأنواع الحيوانية التي تتقلب أعدادها دوماً، والأوبئة التي تنتشر وتختفي بصورة مستمرة. ولو أن الطقس يكرّر نفسه بصورة متشابهة، بكل نسائمه وغيومه، لأصبح التنبؤ بالطقس شأناً تافهاً.

وفكر لورنز في إمكان صوغ «حلقة ما» بين ميل الطقس لعدم تكرار نفسه وبين عدم

قدرة الاختصاصيين على توقّع تقلباته؛ حلقة تربط اللادوري مع غير المتوقع. لا يسهل صوغ تلك الحلقة في معادلة رياضية بسيطة. ففي البداية، أصر الكومبيوتر على إعطاء الدورات المُتكرّرة. لذا، عمد لورنز إلى إدخال أنواع مختلفة من التعديلات الطفيفة، للتخلص من هذا التكرار الدوري. وأخيراً، نجح في التوصل إلى التكرار اللادوري عندما أدخل مُعادلة لتغيير كمية الحرارة من الشرق إلى الغرب، مما يُحاكي في الواقع الفعلي مسيرة الشمس عبر الولايات المتحدة وتدفئتها لمياه المحيط الأطلسي. واختفى التكرار. لم يكن أثر جناح الفراشة حادثاً عابراً، بل ضرورة. وحاجّ لورنز بأن التأثيرات البسيطة إنْ بقيت ضعيفة، ولم تتجمع عبر النظام، فعندئذ يُكرر الطقس دوراته التي تصبح منيعة من التأثّر بالتغييرات العشوائية الطفيفة.

وحينذاك، تصبح دورات الطقس تكرارية ومُملة. ولكي تصبح المُحاكاة الإلكترونية للطقس الفعلي في مثل غنى الواقع، يتعيّن حدوث شيء مثل أثر جناح الفراشة. وحاز ذلك الأثر اسماً علمياً: «الاعتماد الحسّاس على الأوضاع الأولية»، والذي لم يكن، بدوره، فكرة جديدة. ويمكن تقصي فكرة مُشابهة في أُغنية فولكلورية أميركية تقول:

«بسبب مسمار سقطت حدوة حصان.
وبسبب حدوة، تعثر حصان.
وبسبب حصان، سقط فارس.
وبسبب فارس، خُسرت معركة.
وبسبب معركة، فُقدت مملكة».

في العلم، كما في الحياة، إن الحوادث المتسلسلة تصل إلى نقطة حرجة، بحيث يتضخّم بعدها أثر الأشياء الصغيرة. وكذلك، نَظّر الكايوس بأن النقاط الحرجة منتشرة في كل مكان. وفي أنظمة مثل الطقس، لا مفر من الاعتماد الحسّاس على الأوضاع الأولية، لأنه ينجم عن الطريقة التي تتداخل فيها التأثيرات البسيطة مع النظام الكبير. ودُهش زملاء لورنز لقدرته على مُحاكاة مفهومي التكرار اللادوري والاعتماد الحسّاس على الأوضاع

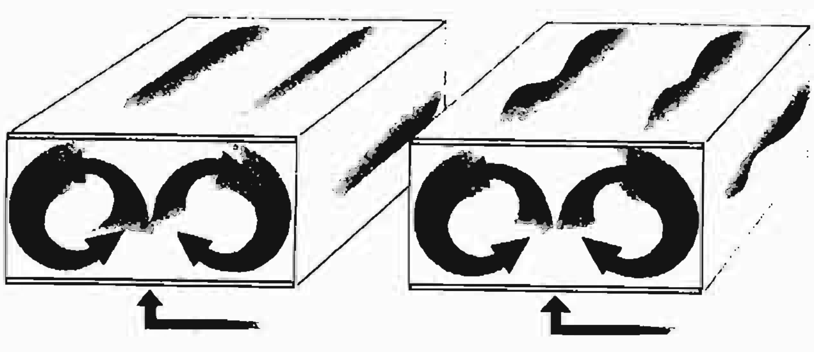
الأولية في «دميته» عن الطقس، التي لا تزيد على ١٢ مُعادلة يُكرر حساباتها بلا كلل كومبيوتر كفوء. كيف تأتى أن يُصنع كل ذلك الغنى والتنوّع، كل اللامتوقع والفوضوي، بواسطة نظام من مُعادلات رياضية حتمية؟

لقد نحّى لورنز الطقس جانباً، وسعى إلى استنباط أساليب أكثر بساطة لصنع السلوك المُعقّد. واستطاع أن يجد مبتغاه في نظام مُكوّن من ٣ مُعادلات رياضية! انتمت تلك المُعادلات إلى النوع غير الخطي (non-linear)، لأنها عبّرت عن علاقات غير متناسبة. وللشرح، يمكن تمثيل المُعادلات الخطيّة في خطوط بيانية مستقيمة، وتُمثّل علاقات بسيطة مثل التناسب الطردي. ويسهل إيجاد حلول لها. وتمتلك ميزة نموذجية، إذ يمكن تفكيكها إلى قطع صغيرة، ثم إعادة جمعها بسهولة، لأن قطعها تتراكب بعضها فوق بعض. وفي المقابل، لا يسهل حل المُعادلات غير الخطّية، ولا تتراكب قطعها بعضها فوق بعض.

وفي النُّظُم الميكانيكية والسائلة، تُمثّل المُعادلات غير الخطيّة الأشياء التي يتجنبها الناس العاديون عندما يسعون إلى التوصل لمفاهيم مُبسّطة. يُعطي الاحتكاك مثالاً عن غير الخطّي، ومن دونه تصبح العلاقة بين كمية الطاقة التي تصل إلى طابة الغولف عند ضربها، وحركة تلك الطابة فوق المضمار مُبسّطة. ويُعقّد الاحتكاك تلك العلاقة لأن الكرة تفقد الطاقة بكميات تتغيّر عبر مسارها. وذلك ما تُعبّر عنه المُعادلات غير الخطّية التي تعني أن اللعب بحد ذاته يُغيّر من قوانين اللعبة. من غير المستطاع وصف الاحتكاك بأنه كمية ثابتة لأنه يتغيّر أيضاً مع السرعة، التي تتأثر بدورها بالاحتكاك! وبسبب هذا التغيّر المُتغيِّر (إذا جاز التعبير)، والذي يؤثر على الصورة الكليّة للأشياء ويتأثر بها، يصعب احتساب قيم المعادلات غير الخطيّة. وفي المقابل، فإنها تصنع أنواعاً من السلوك غنيّة بالتعدد. وفي ديناميكيات السوائل، يعتمد كل شيء على مُعادلة مُفردة اسمها «معادلة نافييه- ستوكس». وتعتبر مُعجزة في الاختصار لأنها تجمع سرعة السوائل وضغطها وكثافتها ولزوجتها. وتنتمي لفئة المُعادلات غير الخطيّة، وبذا، فإن الطبيعة الدقيقة لتلك العناصر تبقى غير مُحدّدة. يُشبه تحليل المُعادلات غير الخطية من نوع «نافييه ـ ستوكس» السير عبر متاهة

سحرية حيث تُبدّل الجدران أوضاعها مع كل خطوة. وبحسب كلمات فون نيومان: «تُغيّر المُعادلة من طبيعتها، وتُبدّل معطياتها كلها، ما يجعل العملية الرياضية شائكةً». لو أن مُعادلة «نافييه ـ ستوكس» لم تكن من النوع غير الخطّي، لتغيّر شكل العالم، ولما احتاج العلم لنظرية الكايوس.

اختار لورنز المُعادلات غير الخطّية الثلاث بوحي من نوع من حركة السوائل، وخصوصاً صعودها وهبوطها أثناء حملها للحرارة. ففي الغلاف الجوي، يُهيّج حمل الحرارة الهواء انطلاقاً من الأرض التي تُسخّنها الشمس على مدار النهار، فترتفع موجات الهواء الحاملة للحرارة إلى الأعلى. ويُشبه ذلك أيضاً تصاعد الأبخرة من سطح كوب قهوة ساخن. وبحسب رأيه فهي إحدى الظواهر التي لا تُحصى والمتصلة بالحركة الديناميكية للسوائل، والتي من غير المُستطاع التنبؤ بمساراتها. كيف تُحتسب المُدّة اللازمة ليبرد فنجان من القهوة؟ إذا لم يكن حاراً جداً، تتبدد الحرارة من دون أي دور لحركة السوائل. وتبقى القهوة في حال ثابتة. وإذا كان شديد السخونة، فإن تموّجات نقل الحرارة تصعد من قعر الفنجان لتبرد على سطحه. وتُصبح عملية نقل الحرارة في القهوة مرئية عند نثر القليل من الكريما على سطحه.



السوائل الدوّارة: عندما يُسخّن سائل أو غاز من الأسفل، يميل الوسط إلى تنظيم نفسه على هيئة لفائف أسطوانية الشكل. (الرسم أعلاه ـ إلى اليسار). وترتفع موجات من ذلك الوسط من إحدى الجهات، فتفقد الحرارة، فتهبط من الجانب الآخر. وعند الاستمرار في التسخين (الرسم أعلاه ـ إلى اليمين)، يسود عدم الاستقرار، وتميل اللفائف الأسطوانية إلى التأرجح ذهاباً وإياباً على امتداد طولها. ومع المزيد من الحرارة، يُصبح النظام منفلتاً وعشوائياً بشدة.

وتصبح التموّجات أكثر تعقيداً. ولكن المآل البعيد المدى لهذا النظام واضح. فمع تبدد الحرارة، ولأن الاحتكاك يبطئ حركة السائل، فإن تموجات نقل الحرارة تتوقّف لاحقاً. وفي حديث أمام جمع من العلماء، لاحظ لورنز أنه: «توجد صعوبة في التنبؤ بحرارة فنجان من القهوة خلال دقيقة، لكن من السهل التنبؤ بما ستكونه خلال ساعة». يجب أن تعكس المُعادلات التي تتحكم بابتراد فنجان من القهوة، المآل النهائي للنظام فيه. يجب أن تميل للتبدد. يجب أن تتجه الحرارة لكي تتساوى مع حرارة الغرفة، فيما تصل سرعة السوائل إلى الصفر.

عمل لورنز على مجموعة من المُعادلات عن موجات نقل الحرارة بالحمل، وبسّطها بحيث لم تعد تتضمن سوى العناصر الأكثر أساسية فيها. ولكنه أبقى على اللاخطيّة فيها. وظاهرياً، بدت المُعادلات سهلة الحل لكل عارف بالفيزياء، ولكنها سهولة مُخادعة تماماً!

تُقدّم كُتب الفيزياء المدرسية مثالاً مُبسّطاً عن ظاهرة نقل الحرارة بالحمل هو المُكعب الأملس الأسطح الذي يُسخن من الأسفل ويُبرّد من الأعلى. ويتحكم الفرق في الحرارة بين القعر والسطح بالحركة في السائل. وعندما يكون الفرق بسيطاً، يبقى النظام ساكناً.

تتحرك السخونة إلى السطح الأعلى بالتوصيل، كما يحصل في قضيب حديد، من دون أن تُحرّك السائل. ويبقى النظام ثابتاً أيضاً. وإذا نُقر خطاً على المكعب، يهتزّ السائل قليلاً، لكنه يُعاود السكون سريعاً. ومع تسخين المُكعّب، يظهر نوع آخر من السلوك. فعندما يسخن السائل في الأسفل، يتمدد، ويُصبح أقل كثافة، ويخف وزنه، ويتغلب على قوة الاحتكاك، فيرتفع إلى الأعلى. وفي مُكعب منتظم، يؤول الأمر إلى ظهور تموجات أسطوانية الشكل، حيث يصعد السائل الساخن من أحد جوانب المُكعب، ويهبط السائل الأبرد من الجانب الآخر. وإذا نُظر إلى جنبه، تتخذ تلك الحركة شكل دائرة مُتصلة. وكثيراً ما تصنع الطبيعة مكعبات مماثلة. فعندما تُسخّن الشمس الصحراء مثلاً، يرتفع الهواء متخذاً أشكالاً مُتعددة تظهر في السُحب أو تترك آثارها على الرمال.

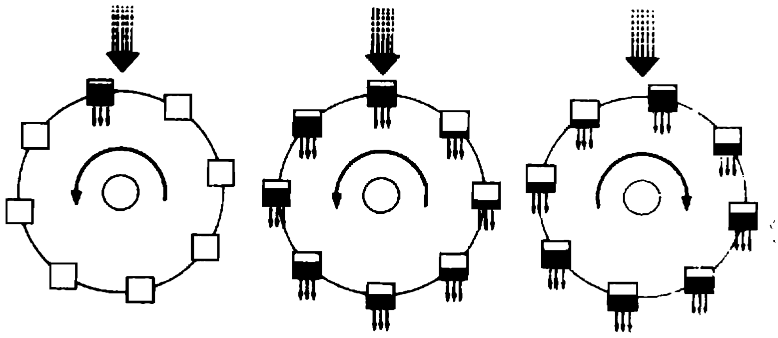
ومع زيادة التسخين، تزداد الحرارة تعقيداً. تشرع اللفائف في التأرجح.

واستطاع لورنز صنع مُعادلات مُبسّطة نسبياً بحيث تستطيع صنع نموذج عن هذا النوع من التعقيد.

وتُركّز المُعادلات على معلم من تلك الظاهرة المُعقّدة: الحركة الدائرية للسائل صعوداً وهبوطاً، بأثر الحرارة ونقلها بالحمل. واحتسبت تلك المُعادلات سرعة تلك الحركة وكميات الحرارة المنقولة فيها. إنهما ظاهرتان متداخلتان. فعند صعود كمية من السائل الساخن إلى أعلى، فإنها تلامس سائلاً أقل حرارة، فتفقد سخونتها، وتشرع في الهبوط قبل أن تتم طريقها صعوداً. وعندما تبلغ الحركة الدائرية سرعة كافية، فإن كرة من السائل الساخن لا تفقد ما تحمله من حرارة حتى عند وصولها إلى الأعلى وسيرها للهبوط مُجدداً من الجانب الآخر، لذا فإنها تُعاود الصعود قبل أن تهبط كثيراً إلى الأسفل، مما يؤثر أيضاً في حركة الكرات الساخنة الصاعدة. وعلى الرغم من أن نموذج لورنز لم يستطع صنع نموذج مكتمل عن نقل الحرارة بالحمل، فإنه ماثل كثيراً من الأنظمة الموجودة فعلياً في الطبيعة.

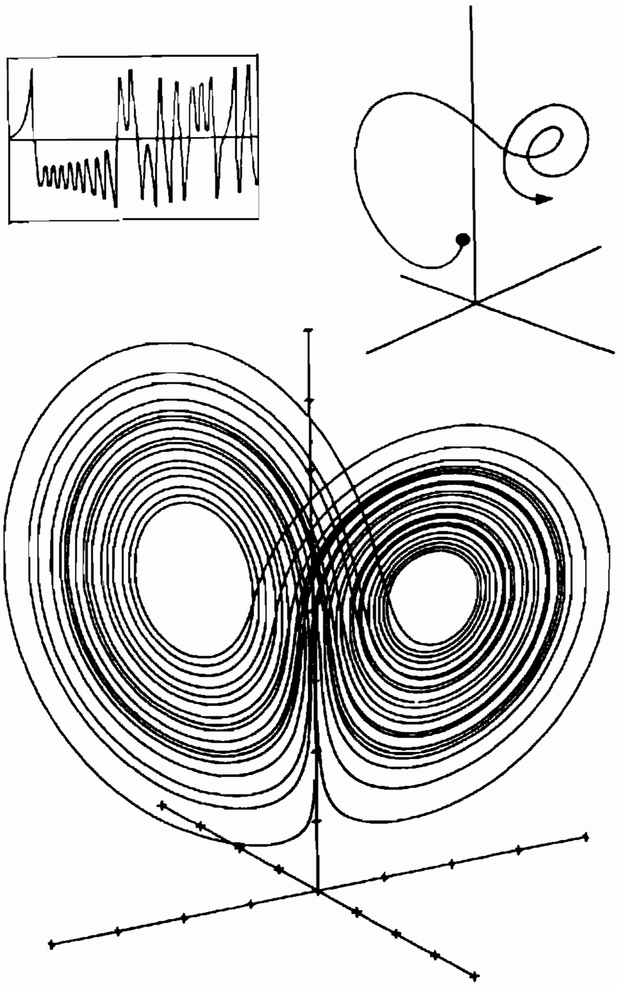
فمثلاً، استطاعت مُعادلات لورنز أن تصف حركة الدينامو، الذي تطوّر ليُصبح مولد الكهرباء بشكله المعروف راهناً، حيث يدور تيار كهرباء عبر قرص يدور في حقل مغناطيسي. وفي ظروف مُعينة، يعكس الدينامو حركته بنفسه. واقترح بعض العلماء، بعد شيوع مُعادلات لورنز، أن سلوك الدينامو يُعطي تفسيراً لظاهرة الانقلاب المُتكرّر في الحقل المغناطيسي للكرة الأرضية. ويتضمن تاريخ الأرض مجموعة من تلك الانقلابات التي تتكرر عبر فترات زمنية مُتخبطة وغير قابلة للتفسير. وفي مواجهة هذا التخبّط، لجأ العلماء تقليدياً إلى تفسيرات تعتمد على عناصر من خارج النظام، بما في ذلك ضربات النيازك وسقوط الشُهُب. ولعل الحقل المغناطيسي للكرة الأرضية يحمل عناصر فوضاه بداخله.

وتصف مُعادلات لورنز نوعاً آخر من دواليب الماء يُمثّل النظير الميكانيكي للحركة الدورانية للتيارات التي تنقل الحرارة من طريق الحمل في السائل. وفي الأعلى، ترشح قطرات الماء بصورة مستمرة إلى أوعية مُعلقة على إطار الدولاب. وكذلك يرشح كل وعاء



دولاب الماء على طريقة لورنز: أول نظام للكايوس اكتشفه إدوارد لورنز، يشبه دولاب الماء القديم (الذي يُسمى أيضاً ساقية أو ناعورة). وتُعطي هذه الأداة البسيطة نموذجاً من السلوك المُعقّد الذي اهتم به الكايوس. يتشارك دوران دولاب الماء مع مقطع عرضي في اللفائف الأسطوانية الشكل التي تتأرجح في السائل في عملية انتقال الحرارة من طريق الحمل. ويسير كلا النظامين بفضل قوة مستمرة، أكانت الحرارة أم الماء، وكلاهما يُبدّد الطاقة. يخسر السائل السخونة، ويفقد الدولاب الكثير من الماء. وفي النظامين، يعتمد المآل النهائي على استمرارية الطاقة التي تُغذي العملية. يسكب الماء من الأعلى بمعدل ثابت. إذا سكب الماء ببطء، فإن الدلو العلوي لا يمتلئ البتة، ولا يبدأ الدولاب بالدوران. (ويشبه ذلك ألا يُسخّن السائل بالصورة المطلوبة، فلا يتحرك). وعند تدفق المياه من الأعلى بسرعة، فإن وزن الدلو العلوي يدفع الدولاب للحركة (الرسم أعلاه ـ إلى الشمال).
ويمكن أن ينطلق الدولاب ليدور بسرعة ثابتة (الرسم أعلاه ـ في الوسط). وإذا دار الدولاب بسرعة كبيرة (الرسم أعلاه ـ إلى اليمين)، يصبح الدوران فوضوياً، بسبب الطبيعة اللاخطيّة للنظام. ومع مرور الدلاء تحت الماء المنسكب، فان الدرجة التي ستمتلئ بها، تعتمد على سرعة الدوران. فإذا دار الدولاب بسرعة كبيرة، فلن يتسنى للدلاء أن تمتلئ. (يشبه ذلك التحرك السريع في الماء الساخن، حيث كرات الماء ترتفع إلى الأعلى بسرعة، فلا تحمل الكثير من الحرارة). وكذلك يؤدي الدوران السريع للدولاب إلى عدم تفريغ الدلاء في الأسفل، فتنتقل إلى جهة الصعود وهي مُحمّلة بالماء. وينجم عن ذلك أن الدلاء الثقيلة على الجانبين، نزولاً وصعوداً، تُبطئ من دوران الدولاب، ثم تسيّره في الاتجاه المُعاكس. واكتشف لورنز أيضاً، أن الدوران ينقلب على نفسه مرات عدّة، بمرور الزمن، ولا يصل إلى مرحلة ثابتة ولا يُكرّر نفسه عبر أي نمط قابل للتوقّع.

بصورة مستمرة، فيتساقط ماؤه إلى فتحة صغيرة. وعندما يكون تيار الماء ضئيلاً، لا تمتلئ الأوعية العلوية على نحو كافٍ للتغلّب على الاحتكاك والبدء في تحريك الدولاب. ومع تسارع التيار، يصل وزن الوعاء إلى مرحلة يشرع فيها الدولاب بالدوران. ومن الممكن أن يصبح الدوران مستمراً. وإذا ازدادت سرعة التيار، تتأرجح الأوعية طوال الوقت، أثناء نزولها إلى الأسفل ثم صعودها من الناحية الثانية، مما يؤثر في حركة الدولاب الذي ربما تباطأ أو توقف أو قلب اتجاه دورانه.



جاذب لورنز: يُشبه هذا الرسم قناعاً له وجه بومة أو جناحا فراشة. ويُعتبر نموذجاً عن المراحل المُبكرة في نظرية الكايوس. ويُظهر البنية المرهفة التي تُخبّئها المعلومات العشوائية. فتقليدياً، من الممكن إظهار التقلّب في قيمة متغيّر ما بواسطة الخطوط البيانية التي تُسمى التسلسل الزمني (الرسم أعلاه). ولإظهار العلاقة بين ثلاثة متغيِّرات، يُستعمل أسلوب آخر. ففي كل لحظة، تتقاطع تلك المتغيِّرات عند نقطة في فضاء من ثلاثة محاور. وكلما تغيّر النظام، ترسم حركة تلك النقطة التقلّب في المتغيّرات الثلاثة. ولأن النظام لا يُكرّر نفسه تماماً، فكذلك لا تتكرر الخطوط التي ترسمها حركة النقطة. وبدلاً من ذلك، فإنها تدور وتدور. إن الحركة على الجاذب مُجرّدة، لكنها تُعطي فكرة عما يحدث في النُّظُم الحقيقية. فمثلاً، الخطوط التي تعبر من أحد جناحي الجاذب إلى الآخر، تمثّل انقلاباً في اتجاه حركة دولاب الماء أو في تيارات الماء التي تنقل الحرارة بالحمل.

وقبل نظرية الفوضى، اتجه حدس الفيزيائيين للقول إن النُّظُم الميكانيكية البسيطة تميل للوصول إلى حال مستقرة، إذا لم يتغيّر تيار الماء. فإما أن يدور الدولاب أو يتأرجح بصورة ثابتة، مُقلِّباً اتجاه دورانه عبر فترات ثابتة. وذلك ما خطّأه لورنز. واستطاع استعمال ثلاث مُعادلات، بثلاثة متغيّرات، ليصف الحركة في هذا النظام. وهكذا، طبع كومبيوتر القيم المتبدلة للمتغيّرات الثلاثة على النحو الآتي: ٠-١٠-٠؛ ٤-١٢-٠؛ ٩-٢٠-٠؛ ١٦-٣٦-٢؛ ٣٠-٦٦-٧؛ ٥٤-١١٥-٢٤؛ ٩٣-١٩٢-٧٣. تصعد الأرقام الثلاثة وتهبط مع مرور الوقت الافتراضي.

ولصنع صورة من تلك المعلومات، عبّر لورنز عن كل مجموعة من ثلاث معلومات، بنقطة في الفضاء الثلاثي الأبعاد. وأعطت تسلسلات الأرقام مجموعات من النقاط التي تُعبّر عن مسار مُتّصل، ومن ثم فإنها تُسجّل حركة النظام. يمكن المسار أن يوصل إلى مكان ثم يتوقف، مما يعني أن النظام وصل إلى حال مستقرة، لا تتبدل فيه حرارة المتغيّرات ولا حركتها. وعندما يتخذ المسار شكلاً حلزونياً، فإن ذلك يعني أنه وصل إلى نمط من الحركة يتكرر دورياً. ولكن نظام لورنز لم يصل لا إلى التوقف ولا إلى التكرار الدوري، بل أعطى أشكالاً تُعبّر عن تعقيد مُرهف. وبقي دوماً ضمن حدود معينة، لكنه رسم ضمنها أشكالاً غرائبية، تشبه حلزوناً مزدوجاً في فضاء ثلاثي الأبعاد، كجناحيّ فراشة. أشّرت الأشكال إلى فوضى تامة، لأن أياً من نقاطها لم يتكرر على الاطلاق، ولكنها عبّرت أيضاً عن نوع جديد من الانتظام.

بعد سنوات، تحدّث الفيزيائيون بإعجاب عن الأشكال التي صنعها كومبيوتر لورنز، وكذلك عن مُعادلاته. وأغرقوا في مديحها، كأنها تحتوي على سرّ الأبدية. وأشارت آلاف المقالات التي كتبت عن الكايوس إلى «التدفق غير الدوري المُحتم». ولسنوات طويلة، أوحت مقولات لورنز بما لا حصر له من الرسوم، وحتى الأفلام.

واشتهرت تلك الأشكال الحلزونية باسم «جاذب لورنز». وللمرة الأولى، أظهرت

الصور التي يصنعها كومبيوتر لورنز أن ما تُعبّر عنه يشكّل أمراً «مُعقّداً» لأنها تضم الغنى الهائل للكايوس.

وفي المقابل، فعند ظهور تلك الرسوم، لم يفهمها سوى قلة. وتحدث عنها لورنز لوليم مالكوس، أستاذ الرياضيات التطبيقية في «معهد ماساشوستس للتقنية» الذي اشتهر بدماثته وقدرته على التقويم الإيجابي لعمل زملائه. وضحك مالكوس، قائلاً: «إدوارد... يعلم كلنا، كلنا، أن السوائل التي تُسخّن لا تتصرف بهذه الطريقة». وأشار مالكوس إلى أن التعقيد الذي يشير إليه لورنز يختفي بسرعة، ليصل النظام إلى حال مستقر من الحركة المنتظمة.

وبعد أعوام، خطّأ مالكوس نفسه قائلاً: «لقد أخطأنا النقطة الأساسية كليّاً... لم يكن إدوارد يُفكّر من خلال مفاهيمنا الفيزيائية، بل فكرّ في نوع من النموذج المُجرّد الذي يُظهر أنه كان يتبع حدسه بأنه لم يستطع قول ذلك مباشرة. لكننا نرى الآن أنه فكّر بتلك الطريقة».

لا تعرف سوى قلة من الناس درجة التقسيم العالي التي وصل اليها التخصص العلمي، وكذلك مدى الانعزال بينها. يملك علماء البيولوجيا الكثير ليقرأوه عوضاً عن الانغماس في الرياضيات، فيما يتعيّن على علماء الهندسة الوراثية قراءة الكثير ما لا يتيح لهم الاطلاع على بيولوجيا الجموع. وثمة ما يشغل علماء الفيزياء أكثر من قراءة المجلات عن الطقس. ولذا، أثار اكتشاف لورنز حماسة عند قلة من علماء الرياضيات. ولكن، بعد أقل من عقد، انغمست مجموعات من الفيزيائيين وعلماء الرياضيات والفلكيين والبيولوجيين في إعادة النظر باكتشاف لورنز، وأحياناً، توصلوا إليها بأنفسهم. لقد كان لورنز عالماً في المناخ، ولذا، لم يتوقّع أحد أن تولد نظرية الكايوس من مقال على الصفحة عشرين في العدد ١٣٠ من «مجلة علوم الغلاف الجوي».

الثورة

«بالطبع، يكمن الجهد كله في أن يضع المرء نفسه
خارج المدى التقليدي لما يسمّونه إحصاءات»

ستيفن سبندر

وصفَ مؤرخ العلوم توماس كوهن تجربة مثيرة أجراها اختصاصيّان في علم النفس، في أربعينات القرن العشرين. عرضت أوراق لعب، بصورة سريعة جداً، على مرأى من المشاركين في التجربة. وطُلب منهم التعرّف إليها. تضمنت التجربة خدعة صغيرة: بعض الأوراق كان زائفاً، مثل البنت الديناري بلون أسود، أو الستة السباتي بلون أحمر.

ومع السرعة العالية، سارت أمور المشتركين بيسر ظاهرياً. وبدت التجربة سهلة. لم يلاحظوا الأوراق الزائفة. وصنّف بعضهم ورقة الستة السباتي الحمراء بأنها «ستة كُبّة» أو «ستة سباتي». وعندما تباطأت سرعة عرض الأوراق، بدأ المشاركون في التردد. ولاحظوا الأوراق غير المألوفة. وقال البعض إنه يرى أوراقاً غريبة، مثل وجود خط أسود على رسم القلب في أوراق الكُبّة.

وبالنتيجة، ومع مزيد من التباطؤ، لاحظ معظم المشاركين الخدعة، لكنهم أكملوا التجربة. لكن بعضهم شعر بحال من الضياع، وهذا ما جعله يتألم فعلياً. وسُمع بعضهم يقول: «لا أستطيع أن أستوعب ذلك... لا تبدو هذه كورقة لعب... لا أعرف اللون... لا أعرف كبّة أو سباتي...».

لا يبدو العلماء المحترفون أنهم أكثر حصانة حيال الالتباس والألم، من المشاركين في تلك التجربة، عندما تواجههم أوضاع نافرة، غير متآلفة مع ما درجوا على معرفته.

وفي المقابل، فإن الأشياء النافرة في إمكانها أن تُغيّر الطريقة التي يُفكر بها العلماء، ومن ثم تدفع العلم قُدماً. ذلك ما لاحظه كوهن، وما تدل إليه نظرية الكايوس. أثار المفهوم الذي قدمه كوهن عن الثورات العلمية، جدالاً لم يخمد، منذ نشره للمرة الأولى في العام ١٩٦٢. لقد وجه ضربة قوية للمفهوم التقليدي الذي يقول إن التقدم العلمي يحدث عبر

تراكم المعرفة، بحيث يضيف كل اكتشاف لما قبله، وإن تراكم المعارف التجريبية يستدعي ظهور نظريات. وهدم المقولات التي تقول إن العلم يسير في عملية منتظمة قوامها طرح الأسئلة والبحث عن إجاباتها. وشدد على التناقض بين معظم الجهد الذي يبذله العلماء الذين يعملون بناء للنظريات السائدة والمستقرة، وبين العمل المُخالف والخارج عن القواعد العلمية والذي يصنع ثورات العلم. وليس من باب المصادفة أن صوّر العلماء باعتبارهم أقل عقلانية. فبالنسبة إلى كوهن، يرتكز العلم تقليدياً على الكثير من عمليات الاستعادة. ويُكرّر العلماء تجارب صنعها آخرون وكرروها أيضاً. ويضيف المشتغلون بالنظريات العلمية حجراً هنا، ويعيدون تشكيل عمود هناك من البنيان النظري للعلوم. ويصعب أن تسير الأمور على غير ذلك النحو. ولو عمل العلماء دوماً من البداية، وتسمروا عند طرح الأسئلة الأساسية، لما توصلوا إلى درجة التقدم التقني اللازمة للأعمال المُفيدة. فمثلاً، في زمن المخترع بنجامين فرانكلين، شُغلت حفنة من العلماء في فهم الكهرباء ومبادئها، ومن ثم اختار كل منهم القانون الذي يريد الاشتغال عليه. فلعل أحدهم يختار الجذب باعتباره الأثر الأهم للكهرباء، فيما يُفكر آخر في الكهرباء كنوع من «التدفق» الذي يخرج من بعض المواد. ويميل ثالث إلى اعتبارها نوعاً من الوسط السائل، الذي تنقله المواد بالحمل. وفي تلك المرحلة، تكون لغتهم سهلة ومفتوحة، لأنهم لم يستقروا بعد على لغة مشتركة ومتخصصة، تتضمن تعريفات ثابتة لمصطلحاتها. وفي المقابل، فإن اختصاصياً معاصراً في ديناميكية السوائل لا يتوقّع أن يتقدم في التعرّف إلى حقل اختصاصه قبل تبنّي مجموعة وافرة من المصطلحات والتعريفات، إضافة إلى التقنيات الرياضية. ولكنه، وبطريقة لا شعورية، يكف عن السؤال عن الأُسس التي يرتكز عليها اختصاصه. وفي القلب من مقولات كوهن، تبرز رؤية عن العلم التقليدي باعتباره مصدراً لحلّ المسائل.

إنها تلك المسائل التي تُحدد الأسلوب المقبول لتحديد الاكتشاف العلمي، والذي يستعمله العلماء أكاديمياً في أعمالهم وبحوثهم وأوراقهم ومقالاتهم التي تُنشر في

المجلات العلمية وغيرها. وكتب كوهن: «في الأوضاع الطبيعية، لا يكون الباحث مخترعاً، بل ماهراً في حلّ المسائل المُعقّدة. وتجذبه المسائل التي يمكن صوغها وحلّها ضمن التقاليد العلمية الراسخة».

ثم تأتي الثورات. يظهر علم جديد من قلب آخر وصل إلى نهاية مسدودة. كثيراً ما تملك الثورة القدرة على عبور التقسيمات بين الاختصاصات العلمية. وكثيراً ما تأتي اكتشافاتها من أشخاص يصعب إدراجهم في اختصاص مُحدد. وتسكن هؤلاء هواجس تبدو غير مبررة في نظر أندادهم. وكثيراً ما تُرفض مقالاتهم، ويُنظر إلى أطروحاتهم باعتبارها غير مُجدية. ويبدو هؤلاء المتمردون غير متيقّنين من أي شيء، بما في ذلك قدرتهم على العثور على إجابة لما يبحثون عنه. لكنهم يغامرون بمصيرهم المهني. يعمل القليل من المفكرين بمفردهم، غير قادرين على شرح الاتجاه الذي يسيرون فيه، بل يخشون أن يفصحوا لأقرانهم عما يساورهم. إن هذه الصورة «الرومانسية» تقف في القلب من مخطط كوهن. وقد حصلت واقعياً وتكررت، أثناء اكتشاف نظرية الفوضى.

يملك معظم العلماء الذين اهتموا مبكراً بالكايوس قصة عن الإحباط الذي عاشه والعداوات التي اندلعت حوله. إذ حُذّر طلاب المرحلة النهائية في الجامعات بأنهم يغامرون بمستقبلهم المهني إذا كتبوا أطروحات عن نظرية الفوضى، خصوصاً أن المشرفين عليهم لم يكونوا على دراية كافية بها. ربما مال اختصاصيّ ما في رياضيات الجسيمات لهذا الاتجاه الجديد في الرياضيات، وربما اشتغل عليه، لكنه لن يجرؤ على البوح بما يفعل علانية. وشعر الأكاديميون المُخضرمون أنهم يعيشون «أزمة منتصف العمر»، إذ دهمتهم نظرية شاملة جديدة على نحو غير متوقّع، ولا يملكون معارف تكفي للتعامل معها، ما يجعلهم يحسون بأنهم يقامرون بكل شيء إذا أيدوا البحوث المتعلقة بها. وعلى الرغم من ذلك، يشعر بعضهم بإثارة فكرية تدفعهم للانخراط في الحركة الجديدة. فبالنسبة لفريمان دايسون، جاءت الأخبار عن نظرية الفوضى في سبعينات

القرن العشرين، وكأنها «صدمة كهربائية». وأحسّ آخرون بأنها المرة الأولى التي يشهدون فيها انتقالاً في النموذج العلمي، أو ثورة علمية تُغيّر من طرق التفكير السائدة.

عانى الذين تبنّوا الكايوس في أيامه الأولى من عدم قدرتهم على صوغ أفكارهم ومعطياتهم في مقالات علمية قابلة للنشر. مجموعة من تلك الأفكار بدت وكأنها تقع في منزلة ما بيْن علمين بحيث بدت شديدة التجريد بالنسبة إلى الفيزيائيين، ولكنها مُفرطة في العملانية بالنسبة إلى علماء الرياضيات! وتنبّه آخرون إلى الصعوبة في توصيل الأفكار الجديدة والمقاومة التي وُجهت بها أيضاً، إنما تدلان إلى ثورية علم الكايوس. فمن الممكن امتصاص الأفكار السطحية؛ فيما تُثير الأفكار التي تطلب من الناس إعادة تنظيم صورة الكون في مخيلاتهم، عداوات مُرّة.

يستهل جوزيف فورد، الفيزيائي من «معهد جورجيا للتقنية» حديثه باقتباس من تولستوي: «أعرف أن معظم الرجال، بمن فيهم المُعتادون على التعامل مع المشكلات الكبرى، يجدون صعوبة هائلة في تقبّل أبسط الحقائق إذا أرغمتهم على الإقرار بخطأ المفاهيم التي اعتادوا أن يشرحوها لزملائهم بسعادة، والتي لقّنوها إلى الآخرين بفخر، والتي تتداخل مع نسيج حياتهم خيطاً خيطاً». عند انطلاقة نظرية الفوضى، ظل معظم العلماء غير مُطّلعين عليها. وحمل بعض الاختصاصيين في النظريات التقليدية عن ديناميكا السوائل مرارة تجاهها. وفي البداية، بدت مقولات الكايوس وكأنها شطحات ومزاعم غير علمية. عدا أنها اعتمدت على رياضيات غير تقليدية ومُعقّدة. ومع انتشار المؤيدين لنظرية الفوضى، عبست بعض الأقسام العلمية ممن تبنّوها بالضد من رفض زملائهم لها؛ وتقبلتها أقسام أخرى سعياً وراء الشهرة. وانتشر في بعض المجلات العلمية اتفاق ضمني على رفض نشر المقالات التي تشرح الكايوس؛ فيما مالت أُخريات للأخذ بها بصورة حصرية. ثم أخذ علماء الكايوس بالظهور بكثافة في لوائح المنح الدراسية والجوائز العلمية. وعند منتصف الثمانينات من القرن العشرين، أدى تزايد أتباع نظرية الفوضى إلى تسلّم بعضهم مراكز أكاديمية مرموقة. ثم ظهرت مراكز

ومؤسسات تتخصص في «الديناميات غير الخطيّة» و«النُّظُم المُعقّدة». لم تصبح الكايوس مجرد نظرية بل أسلوب عمل؛ ولم تقتصر على مجموعة من القوانين، بل صارت منهجاً علمياً. وصنعت نظرية الفوضى تقنيتها الخاصة في عالم الكومبيوتر، والتي لا تتطلب استعمال حواسيب خارقة مثل «كراي» و«سايبر»، بل تتأقلم مع الكومبيوترات المتوسطة التي يتفاعل بعضها مع بعض بمرونة عبر الشبكات. وبالنسبة إلى الباحثين في مجال الكايوس، باتت الرياضيات علماً تجريبياً يحلّ فيه الكومبيوتر محل المختبرات والأنابيب والميكروسكوبات. تعتمد تلك التقنية على الصور التخطيطية (الغرافيكية)، التي اعتبرت نوعاً من التمثيل الرقمي للمعادلات الرياضية.

وبحسب كلمات اختصاصي في الكايوس، «إن العمل على نظرية الفوضى من دون صور غرافيكية هو تعذيب للذات... كيف يمكن ملاحظة العلاقة بين الحركة وقوانينها في الكايوس؟ كيف يمكن للباحثين أن ينموا حدسهم بخصوص نظرية الفوضى، من دون الصور التخطيطية؟» عمل البعض على نظرية الفوضى، مُنكرين طابعها الثوري. وفي المقابل، تعمد آخرون استعمال مصطلحات المؤرخ توماس كوهن عن الثورة العلمية التي تتمثّل في الانتقال من نموذج علمي جذري إلى آخر مُغاير له كلياً.

ودأبت الأوراق الأولى للكايوس على استحضار صورة العالم الأميركي الراحل بنجامين فرانكلين الذي عُرف بإصراره على العودة إلى البدايات والعمل عليها. وبحسب ملاحظة مشهورة عن كوهن، تتبنّى العلوم المستقرة مجموعة من المعارف التي تستعمل، في المجتمع العلمي، نقطة انطلاق للبحوث. ويستخدم العلماء لغة تبدو وكأنها سرية، في مستهل أوراقهم وخاتمتها. وعلى العكس من ذلك، حملت مقالات الكايوس، في سبعينات القرن العشرين، نبرة تبشيرية؛ وأعلنت معتقداً جديداً، وحضّت على عمل من نوع مختلف. وسادتها عبارات من نوع: «إن تلك النتائج تبدو مثيرة وتحريضية... إن صورة نظرية عن المراحل الانتقالية شرعت في التبلور... في القلب من الكايوس هناك

قدرة الرياضيات على التواصل معها... تزعم نظرية الفوضى أنها تُمهّد للمستقبل، كما لم يفعل أحد من قبل... لقبول المستقبل، يجب رفض الماضي...».

صعدت آمال جديدة. برزت طرق لم تكن معروفة قبلاً. ويكمن الأهم في أن الكايوس مثّل رؤية جديدة. لا تأتي الثورات مجتزأة، لأن نصاً عن الطبيعة يحل محلّ آخر. وينير ضوء جديد المسائل القديمة، كما تبرز مسائل لم تكن منظورة قبلاً. يقول كوهن: «في الثورة العلمية، يبدو المجتمع العلمي برمته وكأنه انتقل فجأة إلى كوكب آخر، حيث تُرى الأشياء المألوفة في ضوء جديد، وترافقها مسائل غير معهودة أيضاً».

تمثّل فأر المختبر لعلم الكايوس الجديد في رقّاص الساعة الذي لطالما جسّد الفيزياء الميكانيكية التقليدية، ورَمَزَ طويلاً للدقة والانتظام التام. كرة تتأرجح على طرف حبل ألا تبدو كأبعد شيء عن الفوضى؟

وفي تاريخ الأساطير العلمية أن لأرخميدس مغطس حمامه، ولنيوتن تفاحته، ولغاليليو شمعدان الكنيسة الذي يتأرجح فوق رؤوس المُصلين، ليبثّ رسالة متكررة ورتيبة ووحيدة الإيقاع.

وفي العام ١٦٥٧، استطاع كريستيان هيغنز أن يحوّل التأرجح المنتظم لرقّاص الساعة إلى أداة لرصد الوقت، مما وضع الحضارة المسيحية على طريق لا عودة عنه. وبعده بوقت طويل، وفي مبنى «البانثيون» الباريسي، استعمل فوكو رقّاصاً تدلى عبر عشرين طبقة، ليحتسب دوران الأرض. إن كل ساعة حائط أو معصم، اعتمدت بدرجة أو أخرى على مبدأ الرقّاص، إلى أن ظهرت ساعات الكوارتز. وفي الفضاء الخالي من الاحتكاك، تظهر الحركة الدورية في مدارات الكواكب. وأما على الأرض، فإن كل تأرجح منتظم يأتي من الرقّاص وأشباهه. إن المعادلات الأساسية في الكهرباء توصف باستعمال مُعادلات مستقاة من حركة الرقّاص، وكذلك النبضات الإلكترونية، على رغم أن سرعتها تفوق ملايين المرات الرقّاص الميكانيكي.

وفي القرن العشرين، صارت الفيزياء شأناً أكاديمياً صرفاً. وزيّن رقّاص الساعة

المتاحف العلمية، فيما حلّ مكانه في معارض المطارات كرات تتأرجح بانتظام عرفت باسم «كرات الفضاء». لم يعد العلماء يهتمّون بأمر الرقّاص.

وكساحر يُخرج أرنباً من قبعته، بدا أن للرقّاص أسراراً أخرى. وكما حصل أيام غاليليو، تحوّل إلى حجر الأساس في ثورة الكايوس. ويرد في التاريخ، أن الفيلسوف اليوناني أرسطو، حين رأى الرقّاص، وصفه بأنه وزن يصارع للنزول إلى الأرض، فيتخبط ذهاباً وجيئة لأن الحبل يمنعه مما يسعى إليه! إن الحركة الميكانيكية، بالنسبة إلى أرسطو، لم تمثّل قوة ولا كمية، بل نوعاً من التغيّر، وعلى غرار وصف نمو الإنسان بأنه نوع من التغيّر، وصف أرسطو الجسم الساقط إلى الأرض بأنه يحاول الوصول إلى حال مستقرة، أي الحال التي يستمر فيها لو تُرك لشأنه. وفي معنى ما، لم يكن أرسطو مخطئاً كليّاً! وفي المقابل، فعندما نظر غاليليو إلى رقّاص الساعة رأى فيه الانتظام القابل للقياس. ولشرح ذلك الانتظام، اقتضى الأمر ثورة علمية في فهم حركة الأجسام. ولم يتفوق غاليليو على أسلافه الإغريق بامتلاك معلومات أكثر. إن فكرته عن انتظام حركة الرقّاص اقتضت أن يتناوب مع أصدقائه في عدّ تأرجحاته خلال ٢٤ ساعة، مما يُعتبر جُهداً هائلاً بالنسبة لتجربة محدودة. وقد رأى غاليليو الانتظام لأنه امتلك نظرية تتوقّع ذلك الأمر. وفهم ما عجز أرسطو عنه: إن الأشياء المتحركة تنحو للاستمرار في الحركة؛ وإن تغيير حركاتها يقتضي تدخل قوة من الخارج مثل الاحتكاك.

بلغت نظرة غاليليو من القوة أنها مكّنته من ملاحظة انتظام لا وجود له فعلياً! فقد زعم أن رقّاص الساعة يستطيع الحفاظ على الوقت، وأنه يتأرجح في أوقات منتظمة، بمعزل عن المسافة التي يقطعها في الترجّح. إن رقّاصاً يقطع مسافة طويلة في تأرجحه، يسير بسرعة أكبر ليقطع تلك المسافة في زمن يساوي ما قد يستغرقه في قطع مسافة أقل. وبعبارة أُخرى، فإن دورة التأرجح لا تعتمد على مسافته. وبحسب رأيه: «لو أن صديقين احتسبا تأرجحين، أحدهما أكبر مسافة من الآخر، ولمئات المرات، فإن حساباتهما لن تختلف ولو بمقدار جزء صغير».

وصاغ غاليليو مزاعمه في صيغة تجارب. وبدت نظريته مقنعة حتى إنها ما زالت تُدرّس راهناً. لكنه مخطئ. لا يُشكّل الانتظام الذي رصده غاليليو سوى مجرد تقريب. إذ يولّد التغيّر في زاوية الكرة في طرف الرقّاص بعض الحركة اللاخطيّة في المُعادلات التي تُعبّر عن الرقّاص بدقة أكثر. وفي الرقّاص الذي يتأرجح لمسافة قصيرة، يكون التغيير طفيفاً جداً، إلىٰ حدّ كبير. لكنه موجود، وقابل للقياس، حتى ضمن تجربة بدائية، كتلك التي وصفها غاليليو!

أمكن التغاضي دوماً عن الحركة اللاخطيّة الصغيرة المقدار. ويتعلّم الذين يجرون التجارب بسرعة أنهم يعيشون في عالم غير كامل. وفي أزمنة غاليليو ونيوتن، كان من الأساسي السعي للعثور على الانتظام. وسعى ناس المختبرات إلى الكميات التي لا تتغيّر. وعنى ذلك تجاهل الكميات الضئيلة التي قد تتدخل لتهزّ الصورة الصافية.

إذا قال اختصاصيّ في الكيمياء إن مادتين تتناسبان بمعدل ٢,٠٠١ يوماً ثم عدّل ذلك إلى ٢,٠٠٢ بعد أيام، ثم إلى ١,٩٩٨ ، فسيبدو مجنوناً إذا لم يسع إلى نظرية تصف العلاقة بين المادتين بأنها ١ إلى اثنين. ولكي يجعل نتائجه صافية، عمد غاليليو إلى تجاهل الحركات اللاخطيّة التي يعلم بوجودها، وهي الاحتكاك ومقاومة الهواء. تُشكل مقاومة الهواء أمراً مُزعجاً في كثير من التجارب، ولذا توجّب إزاحتها للتوصّل إلى جوهر علم الميكانيكا الجديد، حينها. هل تسقط الريشة بمثل سرعة الحجر؟ تنفي التجارب المُعاشة ذلك، لكن القصة الذائعة الصيت لغاليليو مع تلك الأجسام المختلفة التي رماها من برج «بيزا» المائل، ليثبت العكس، تدل على تغيّر المعرفة الحدسية باختراع عالم مثالي علمياً حيث يمكن عزل الانتظام عن فوضى التجارب وتشوّشها.

شكّل عزل تأثير الجاذبية على جسم ما، عن أثر مقاومة الهواء إنجازاً فكرياً لامعاً. وأتاح لغاليليو أن يقترب من جوهر قوتي الدفع الذاتي والقصور. ولكن، في العالم الفعلي، تتأرجح الرقّاصات بطريقة أقرب إلى ما فكّر فيه أرسطو. وتتوقف!

إذاً، ولإرساء حجر الأساس للنموذج العلمي الجديد، شرع الفيزيائيون في مواجهة ما

ظنوا أنه نقص في معارفهم عن النُّظُم الديناميكية البسيطة، مثل رقّاص الساعة. وفي القرن العشرين، يتنبّه العلم جيّداً لأثر القوة الصغيرة التي تُبدّد الحركة، مثل الاحتكاك، بل يُدرّس الطُّلاب معادلاتها. ويتعلّم هؤلاء أيضاً أن النُّظُم اللاخطيّة لا حلول لها، وهذا صحيح، مع وجود بعض الاستثناءات، وذاك غير صحيح. تصف الميكانيكا الكلاسيكية سلوك الأجسام من الأنواع كلها، بما فيها الرقّاص والرقّاص المزدوج والزنبرك المضغوط والقضبان المنحنية والأوتار المشدودة والأقواس المتوترة وغيرها. ويُطبّق علماء الرياضيات القواعد عينها على النُّظُم السائلة والكهربائية. وعندما كانت الميكانيكا التقليدية في ذروتها، لم يتوقّع أحد مقدار الفوضى الكامنة في النُّظُم الديناميكية، والتي تظهر عندما تُعطى القوى اللاخطيّة أهميتها في حسابات الحركة. ولا يتمكن فيزيائي من فهم صحيح للاضطراب أو التعقيد، إلا إذا فهم الرقّاص، بالطريقة التي لم تفهم بها حتى النصف الثاني من القرن العشرين. فمع شروع نظرية الفوضى في توحيد النُّظُم المختلفة، توسّعت دراسة الديناميكيات المتضمنة في حركة الرقّاص، عبر استخدام الليزر وغيره من وسائل القياس الفائقة الدقّة. وتبيّن أن بعض التفاعلات الكيماوية تتصرف مثل رقّاص الساعة، وكذلك ضربات القلب. وتوسّعت مروحة الاحتمالات، بحسب ما لاحظه أحد الفيزيائيين، لتشمل: «الطبين النفسي والجسدي، والتنبؤات الاقتصادية، وربما تطوّر المجتمعات».

لنتأمل في مشهد التأرجح. تتسارع الكرة نزولاً، وتتباطأ صعوداً، وتفقد شيئاً بسيطاً من سرعتها بسبب الاحتكاك. ويقوده الدفع المنتظم الذي يأتي ربما من مُكوّنات الساعة. ويخبرنا الحدس أن تلك الحركة، بغض النظر عن نقطة بدايتها، ستصل إلى مرحلة تنتظم فيها جيئة وذهاباً، إضافة إلى تكرار الحركة عينها. قد يحصل ذلك. لكن الحركة في إمكانها أيضاً أن تتحوّل إلى التخبّط، وألا تنتظم على الاطلاق، وألا تُكرر التأرجحات نفسها البتة.

المُدهش أن التخبّط يأتي من تدخّل القوى اللاخطيّة في مجرى الطاقة التي تدخل

الرقّاص وتخرج منه. ويشرع التأرجح في الخمود، نتيجة الاحتكاك الذي يحاول وقفها، لكنها تستمر لأنها تُقاد من مصدر يُعطيها دفعاً منتظماً. وحتى عندما تتوقّف فإنها لا تكون في حال توازن، بل إن مصدر الدفع هو الذي يدخل في التوازن. إن العالم حافل بنُظُم تُشابه الرقّاص، مثل الطقس الذي يبطئه الاحتكاك الناجم من حراك الماء والهواء وكذلك من تبدد الحرارة إلى الفضاء الخارجي، ويتلقى دفعاً من الشمس وطاقتها.

لم تكن العشوائية سبباً في شروع الفيزيائيين وعلماء الرياضيات بإعادة النظر في معارفهم عن الرقّاص، في ستينات القرن العشرين وسبعيناته. لم تلعب العشوائية، ومن ثم عدم القدرة على التنبؤ، سوى دور لفت الانتباه. فقد اكتشف دارسو ديناميات الفوضى أن السلوك غير المنتظم في النُّظُم البسيطة يؤدي دور العملية الخلاقة. إذ يولّد التعقيد بنُظُمه الغنية التعدد التي تستقر أحياناً وتضطرب أحياناً، وتبدو محدودة في بعض الأوقات وغير محدودة في أُخرى، لكنه يتضمن حيوية أخّاذة.

ولهذا السبب عينه، مال العلماء إلى الألعاب أيضاً. حملت إحداها اسم «كُرات الفضاء» أو «لاعب السيرك الفضائي». وتألفت من كرتين مثبتتين على طرفي قضيب، يتوازن عرضياً على رأس عمود «رقّاص» يحمل كره ثقيلة في أسفله. وتحتوي الكرات الثلاث على مغناطيس خفيف في داخلها. وعندما تدفع للتأرجح، تستمر الكرات في التأرجح بفضل حقل كهرومغناطيسي في قاعدتها السفلية، يتغذّى من بطارية. وعندما تقترب الكرة الثقيلة، تنطلق شحنة كهرباء خفيفة من البطارية، فتعطي دفعة كهرومغناطيسية للكرة. وفي بعض الأحيان، تنتظم هذه الأداة في تأرجح ثابت منتظم. وفي أحيان أُخرى، تبقى حركتها فوضوية، فتتغيّر دوماً بطريقة مُفاجئة.

ثمة لعبة أُخرى من وحي الرقّاص، تحمل اسم «الرقّاص الكروي». وتتألف من ساعد «رقّاص» يتأرجح في كل اتجاه. وقد ثُبّتت حول قاعدته مجموعة من قطع المغناطيس. يجذب المغناطيس الكرة في أسفل الساعد، فيتوقّف، ثم يجذبه مغناطيس آخر. وتكمن اللعبة في إطلاق الرقّاص ثم محاولة توقّع أي مغناطيس سيجذبه.

وحتى عندما يقتصر الأمر على ثلاث قطع مغناطيسية موضوعة على هيئة مثلّث، لا يمكن توقّع حركة «الرقّاص». إذ يتأرجح بين نقاط المثلث الثلاث في ما يُشبه التقافز. لنفترض أن أحد العلماء يستكشف سلوك هذه اللعبة بطريقة منهجية.

ولنفرض أنه رسم حركة «الرقّاص» بين نقاط المثلث على خريطة مُشيراً إلى كل منها بلون مختلف، لنقل الأحمر والأزرق والأخضر. كيف سيبدو شكل تلك الخريطة؟ الأرجح أن تظهر فيها بقع من لون واحد خالص، إضافة إلى كثير من البقع التي تتداخل فيها الألوان على نحو فائق التعقيد. وستظهر قرب النقطة الحمراء، بغض النظر عن طريقة تأرجح الرقّاص، نقاط زرق وخضر. ولن يكون توقع حركة الرقّاص ممكناً.

وتقليدياً، يميل المتخصصون بدراسة الحركة للاعتقاد بأن وضع مُعادلات تصف نظاماً مُعيناً، يعني التوصّل لفهمه.

لكن، هل من طريقة أُخرى لفهم الأشياء؟ بالنسبة لتأرجح الرقّاص، تربط المُعادلات بين سرعته وزاويته والاحتكاك والقوى التي تدفعه. وفي المقابل، ونتيجة تأثير القوى اللاخطيّة الصغيرة في النظام، يعجز الاختصاصيون عن التوصّل لصوغ مُعادلات لتجيب عن أبسط الأسئلة عن مصيره.

وفي إمكان الكومبيوتر أن يتصدى لحل تلك المُعضلة عبر مُحاكاتها إلكترونياً، وإجراء حساب سريع لكل دورة من التأرجح. لكن للمُحاكاة مشاكلها أيضاً، لأن نظام الرقّاص يعتمد بشكل حسّاس على معطيات الأوضاع الأولية. وسرعان ما يقع الكومبيوتر ومُحاكاته في الارتباك.

هل يمكن تجنيب الكومبيوتر هذا الوضع المُحرج؟ لقد عثر لورنز على التخبط وعدم القدرة على التنبؤ، لكنه عثر أيضاً على النمط. واكتشف آخرون ما يشبه البنية ضمن السلوك العشوائي ظاهرياً. لقد كان مثال الرقّاص أكثر بساطة من أن يُتجاهل، وكذلك تضمن رسالة مثيرة. فبمعنى ما، أدرك الذين لم يتجاهلوا مثال الرقّاص أن الفيزياء تفهم الميكانيكيات الأساسية في حركة الرقّاص، لكنها لا تستطيع فهم تقلباتها على المدى الطويل.

لقد فُهم النظام على المقياس الصغير، لكن فهمه على المقياس الكبير مستعص. إن التقليد العلمي القائم على النظر إلى النُّظُم بطريقة ضيّقة، مع عزل بعض الميكانيزمات وإضافة أخرى، آخذ بالتفكك. وبالنسبة إلى «الرقّاص» والسوائل والدارات الكهربائية والليزر، لم تعد المعرفة بالمعادلات الأساسية كافية للقول بمعرفة تلك الأشياء فعلياً.

وفي ستينات القرن العشرين، توصّل علماء آخرون إلى ما لاحظه لورنز. رصد عالم فضاء فرنسي أمراً مماثلاً في مدارات الكواكب السيّارة، كما أنجز مهندس ياباني أمراً مُشابهاً بالنماذج الإلكترونية.

وجاء الجهد المُنظّم الأول لفهم الفرق بين السلوكين الشامل والضيّق، من علماء الرياضيات. ويبرز من بينهم ستيفن سمييل، من جامعة كاليفورنيا في بيركلي، الذي اشتهر بقدرته على حلّ المسائل الشائكة. وسأله فيزيائي عما يعمل عليه، فرد: «أدوات التذبذب». وبدا الأمر نافراً. فقد نُظِر إلى أدوات التذبذب، مثل «الرقّاص» والزنبرك والدارات الكهربائية النابضة، مسائل بسيطة، وتنتشر حلولها تقليدياً في الكتب الأكاديمية. اعتبرت أشياء سهلة، فلم يشغل عالم رياضيات من طراز سمييل نفسه بها؟ وبعد سنوات، أدرك ذلك الفيزيائي الشاب عمق الإجابة التي تلقاها من عالم الرياضيات المخضرم.

لقد اهتمّ سمييل بالنوابض اللاخطيّة والفوضوية التي أحجمت الفيزياء قروناً عن الاقتراب منها.

استهل سمييل عمله من نقطة بعيدة. إذ استخدم صيغاً رياضية صارمة ليقترح أن النُّظُم الديناميكية كلها تميل لسلوك غير مُعقّد في معظم الوقت. لكنه سرعان ما أدرك أن الأمور ليست بما تبدو عليه من السهولة. برع سمييل في الرياضيات إلى حد صُنع برامج رقمية تستطيع حلّ المسائل بنفسها. ومزج معرفته بالتاريخ إلى تضلعه في الرياضيات وحدسه بشأن الطبيعة، ليعلن ببساطة أن ثمة مساحة هائلة من البحوث التي انفتحت حديثاً في الرياضيات. وكمثل رجال الأعمال، قوّم المخاطر الكامنة في تلك المساحة الشائكة، ورسم الاستراتيجية اللازمة لمقاربتها. وسار على خطاه كثيرون. إذ لم تقتصر شهرته على

الرياضيات. ففي الأيام الأولى من الحرب الفيتنامية، نظم مع جيري روبين «الأيام الدولية للاحتجاج». وأشرف على تظاهرات لاعتراض القطارات التي تحمل المُجندين في ولاية كاليفورنيا. وفي العام ١٩٦٦، وفيما حاولت لجنة متخصصة في الكونغرس استصدار مذكرة توقيف بحقه، سافر إلى موسكو للمشاركة في «المؤتمر الدولي للرياضيات» حيث تلقى «ميدالية فيلدز» التي تعتبر أعلى تكريم لعلماء الرياضيات. واندرج المشهد في موسكو، في صيف ذلك العام عينه، في الأسطورة الرائجة عن سمييل. فقد التقى خمسة آلاف من علماء الرياضيات، في ظل تنامي التوتر السياسي عالمياً. وتداولت أيديهم الكثير من العرائض.

وقبيل اختتام المؤتمر، استجاب سمييل لطلب مُراسل صحافي من فيتنام الشمالية، وعقد مؤتمراً صحافياً على مدخل جامعة موسكو. واستهله بإدانة السياسة الأميركية في فيتنام، وما إن لاحت ابتسامة على وجه مُحدثه، حتى أثنى على إدانة غزو الاتحاد السوفياتي لهنغاريا، وكذلك سياسة قمع الحريات فيه. وعندما عاد إلى كاليفورنيا، ألغت «المؤسسة الوطنية (الأميركية) للعلوم» مخصّصاته المالية.

نال سمييل «ميدالية فيلدز» تقديراً لبحوثه في علم «الهندسة اللاكميّة»، الذي يُعرف باسم «طوبولوجيا»، وازدهر بقوة في خمسينات القرن العشرين وستيناته. وتعنى الهندسة اللاكميّة بالصفات التي لا تتغيّر في الأشياء عندما تتعرض للتحوير والتشويه والانضغاط، انطلاقاً من تركيزها على مواقع النقاط المختلفة بالنسبة إلى بعضها البعض وليس بناء على معايير أو مقادير مُحدّدة. ويعمل علماء الطوبولوجيا على الأشياء في أبعادها المتعددة، أي أنهم يذهبون أبعد من هندسة إقليدس الثنائية الأبعاد، أو الهندسة الثلاثية الأبعاد. تُشبه الطوبولوجيا هندسة مُتخصصة في الصفائح المطاطية، بحيث ترصد التركيب الذي لا يتغيّر مع ثني المطاط ومطّه وانضغاطه. فإذا لم يكن من المستطاع تحديد التركيب عبر قياسات كميّة مُحدّدة، فمن الممكن مراقبة التركيب الكلّي ومتغيّراته. واستطاع سمييل حلّ مسألة استعصت على العلماء طويلاً، وعُرفت باسم «حدس بوانكاريه»، في إشارة إلى

مبتكرها العالم الفرنسي الشهير هنري بوانكاريه. وتتعلق بالفضاء المؤلف من خمسة أبعاد وأكثر. وبعدئذ، طارت شهرة سمييل عالمياً. وفي ستينات القرن العشرين، هجر علم الهندسة اللاكميّة. وكرّس جهوده لدرس النُّظُم الديناميكية.

ومن الطريف أن الموضوعين كليهما، أي الهندسة اللاكميّة (طوبولوجيا) والنُّظُم الديناميكيةْ، يجدان جذرهما المشترك عند هنري بوانكاريه الذي اعتبرهما وجهين للعملة نفسها. وفي مطلع القرن العشرين، عُدّ بوانكاريه آخر عمالقة علم الرياضيات ممن يستطيعون صوغ خيال هندسي عن قوانين الحركة في الفيزياء. ويؤثر له تاريخياً أنه مهّد لظهور نظرية الكايوس، كما تضمّنت كتاباته إشارات كثيرة إلى استحالة التنبؤ على المدى الطويل بالنسبة لنُظُم من النوع الذي اشتغل عليه إدوارد لورنز لاحقاً. والمفارقة أن علم الهندسة اللاكميّة ازدهر بعد وفاة بوانكاريه، مقابل تضاؤل الاهتمام بالنُّظُم الديناميكية. حتى إن اسمها أُهمل استعماله. وهكذا، بدا سمييل وكأنه يستعيد ما غبر. وأولى اهتمامه للمعادلات التفاضلية، التي تصف التغيّر في النُّظُم التي تعمل بصورة مستمرة، بمرور الوقت. وقبله، دأب الفيزيائيون على التعامل مع تلك المسائل بصورة ضيّقة، بمعنى أن يهتم المُهندسون بمجموعة مُحددة من احتمالات التغيير في كل مرحلة زمنية، وعلى حدة.

وعلى غرار بوانكاريه، أراد سمييل دراستها بصورة شاملة، بمعنى فهم الاحتمالات كلها وتداخل بعضها ببعض. تنطلق مجموعة المُعادلات التي تُحاول درس النُّظُم الديناميكية، من بعض المؤشرات المُحدّدة. وفي حال مثل نقل الحرارة من طريق الحمل، التي درسها لورنز، تمثّل لزوجة السوائل أحد تلك المؤشرات. تُحدث التقلبات الكبيرة في المؤشرات فروقاً مماثلة في النُّظُم، كحال الفرق بين الحال المستقرة والتأرجح دورياً. ولذا، افترض كثير من الفيزيائيين أن الفوارق الصغيرة جداً لا تتسبب إلا بفروق صغيرة أيضاً، فلا ينجم عنها تغيّرات نوعية في سلوك النظام.

تتجسّد الصلة بين الهندسة اللاكميّة والنُّظُم الدينامكية في إمكان استخدام شكل ما لرؤية المروحة العامة للتغيّرات في النظام. وبالنسبة للنظم البسيطة، يتخذ ذلك الشكل

هيئة سطح مقوّس. أما بالنسبة إلى النُّظُم المُعقّدة، فيحتاج الأمر إلى سطح متعدد الطبقات والأبعاد. إن نقطة معينة في مثل ذلك السطح المُعقّد تُمثّل حال النظام عند لحظة مُعينة بعينها.

وبمرور الوقت، تتحرك تلك النقطة فترسم مداراً عبر ذلك السطح. ويُوازي ثني هذا الشكل تغييراً في مؤشرات النظام، كأن يصبح السائل أكثر لزوجة أو أن تُعطى لرقّاص الساعة دفعات أكثر قوة. وتُعبّر الأشكال التي تتشابه بصورة عمومية، عن سلوك النظام بصورة عمومية. إذاً، فمن المستطاع صنع أشكال تشرح حال النظام.

وأدار سمييل فكره صوب النُّظُم الديناميكية، فبدت له الهندسة اللاكميّة وكأنها شيء مجرّد وبعيد عن عالم الواقع. صحيح أن جذور الهندسة اللاكميّة ترجع إلى الفيزياء، لكن العلماء استغرقوا في درس الأشكال بحدّ ذاتها، وبطريقة مُجرّدة. ولذا، عمل سمييل على هجر التجريد، وتجديد الجسر الذي يربط بين الفيزياء والهندسة اللاكميّة، مثلما أراد بوانكاريه للأمر أن يكون أصلاً.

وتمثّل أحد الاسهامات الأول لسمييل في ما عُرف باسم البداهة الخاطئة. وبالمصطلحات التقنية، فإنه اقترح قانوناً جديداً يمكن طرحه على النحو الآتي: في إمكان النظام أن يتصرف بعشوائية، لكنها عشوائية لا تستقر. وبالنسبة إلى علماء الرياضيات يعتبر الاستقرار من الصفات الأساسية لأي نظام. ويُعرّف السلوك المستقر في النظام بأنه السلوك الذي لا يختفي بمجرد حدوث تغيير صغير في قيمة بعض المؤشرات.

وقد يتّصف سلوك نظام ما بالاستقرار والعشوائية معاً. تعطي المُعادلات التي تصف قلم رصاص أوقف على رأسه، حلاً لكون مركز جاذبية القلم فوق رأسه، لكن لا يمكن للقلم الاستمرار في تلك الحال لأن ذلك الحلّ غير مستقر. ويؤدي أصغر اضطراب إلى جرّ النظام بعيداً عن ذلك الحلّ! وفي المقابل، تستقر كرة من المرمر في قعر الوعاء، لأنها تعود إلى الاستقرار، حتى إذا تعرّضت لاهتزازات بسيطة. وافترض الفيزيائيون أن السلوك الذي يرونه منتظماً هو بالضرورة مستقر، لأن الاضطراب وعدم التشوش لا يمكن

تجنبهما. وبمعنى آخر، يصعب إعطاء قياس المؤشرات بدقّة. إذا أردت نظاماً واقعياً وثابتاً، بحيث لا تهزّه الاضطرابات الصغيرة، فإن ما تسعى إليه هو نموذج مستقر.

بعد عيد الميلاد في عام ١٩٥٩، حمل البريد أخباراً مُزعجة لسمييل الذي كان مقيماً في شقة موقّتة في ريو دي جانيرو (البرازيل) مع زوجته وطفليه وأكوام من الحفاضات. لقد أعطى الحَدس الذي وصفه، تعريفاً لمجموعة من المُعادلات التفاضلية، التي اتّسمت بالاستقرار؛ ولذا فإن النظام العشوائي يمكن تقريبه إلى نظام آخر على شاكلته. لم يكن الأمر كذلك البتة. فقد حمل البريد رسالة من صديق يخبره أن كثيراً من النُّظُم ليست على الاستقرار الذي اقترحه؛ بل أظهرت سلوكاً يتّسم بمزيج من الاستقرار والعشوائية في آن واحد، وبمعنى آخر، فإن العشوائية تستقر. وبذا، تبدو تلك النُّظُم ثابتة. ولا تزول عشوائيتها إذا تعرضت لضغوط خارجية من النوع الذي يهدف إلى التشويش عليها. تُعطي تلك النُّظُم نموذجاً من الثبات والفوضى معاً، الأمر الذي أشعل ذهن سمييل.

وحينذاك، لم يحز الكايوس وعدم الاستقرار سوى تعريفات أوليّة، ولم يكونا متساويين. إن نظام الكايوس يمكنه الاستقرار، إذا استطاع نمطه من عدم الانتظام مواجهة الاضطرابات الصغيرة. ويُعطي برنامج لورنز عن الطقس نموذجاً عن ذلك. ولقد درس سمييل برنامج لورنز، وعلم جيداً أن الفوضى التي اكتشفها، وعلى الرغم مما تتضمنه من التشوّش، تصمد في وجه الاضطرابات، ككرة المرمر في قعر الوعاء. يمكن إدخال كثير من التشوّش على برنامج لورنز، لكنه يعود إلى نمطه، ويتلاشى التشوّش كتبدد الصدى في الأودية. إنه نظام عشوائي في الإطار الضيّق، لكنه مستقر في صورته الشاملة. وفي المقابل، تبيّن لسمييل أن النُّظُم الديناميكية في العالم الواقعي تعمل على نحو أكثر تعقيداً مما تخيّله لورنز ونظامه الافتراضي.

وحملت رسالة زميله وصفاً لنظام بسيط آخر، اكتُشف قبل جيل، لكنه أُهمل ونُسيَ. وصفت الرسالة نظام التذبذب في الدارات الإلكترونية، باعتباره تغيّراً لاخطياً لكنه يتمتع أيضاً بخاصية الانتظام الدوري عبر دفعات من الخارج، مثل طفل في أرجوحة.

ويعود أصل ذلك الوصف إلى العالم الدنماركي بالسازار فان دير بول، الاختصاصي في الكهرباء. وفي عشرينات القرن العشرين، درس فان دير بول سلوك الدارات الكهربائية وتذبذباتها في الأنابيب المفرغة. وفي زمن سمييل، بات باستطاعة طلاب الجامعات أن يرصدوا سلوكاً كهذا على شاشة تلفزيونية، في أداة تحمل اسم «مرسم الذبذبات». لم يملك فانْ دير بول مرسماً كهذا، فرصد تلك الذبذبات عبر تقلّب موجات الصوت في الهاتف. واكتشف سلوكاً منتظماً في تلك الذبذبات مع تغيّر التيار الكهربائي. وقد قفزت موجات الصوت من تردّد إلى آخر، كمن ينزل السلّم مُسرعاً، فتترك تردداً لتثبت على الأدنى التالي، وهكذا دواليك. وعلى الرغم من الانتظام، لاحظ فان دير بول شيئاً بدا ناشزاً؛ إذ ظهر في هذا النظام سلوك عشوائي أحياناً، وبطريقة لم يتمكن من وصفها. ولم يأبه كثيراً لهذا الأمر. وفي رسالة بعث بها إلى مجلة «نايتشر» العلمية المرموقة، كتب فان دير بول: «كثيراً ما سُمع صوت غير منتظم عبر الهاتف قبل أن تقفز الذبذبة إلى التردد الأدنى التالي... لكنها ظاهرة جانبية». لقد كان كالكثير من العلماء الذين لامسوا الكايوس، لكنهم لم يمتلكوا لغة لفهمه. ولم يهتمّ صُنّاع الأنابيب المُفرغة، إلا بالترددات الثابتة القيّمة. أما بالنسبة إلى الذين حاولوا فهم طبيعة التعقيد، فإن ما يثير الاهتمام هو ذلك «الصوت غير المنتظم»، الذي ينجم عن الصراع بين الترددات.

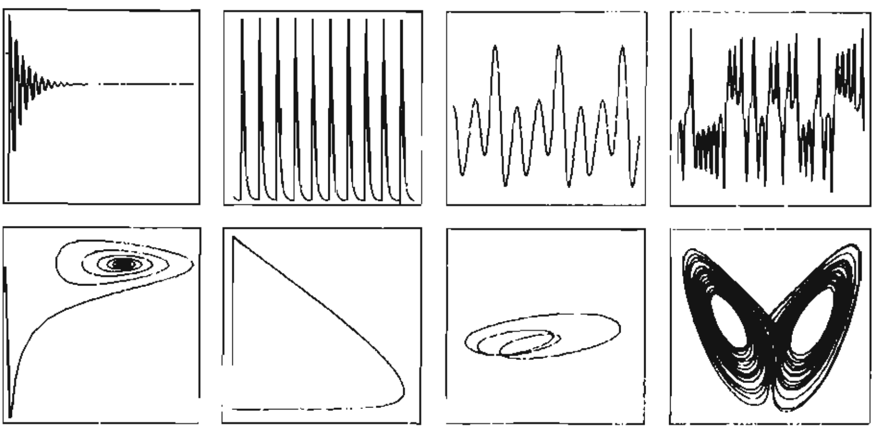
وعلى الرغم من أن «البداهة الخاطئة» التي نظّر لها سمييل لم تكن صحيحة، فقد قدّمت طريقة جديدة في فهم تعقيد النُّظُم الديناميكية. لقد درس كثير من علماء الرياضيات الاحتمالات الأُخرى الكامنة في الأنابيب المُفرغة لفان دير بول. ولكن سمييل شرع في نقل دراساتهم إلى عالم جديد. لم يمتلك مرسماً للذبذبات سوى عقله الذي تشكّل على مدى سنوات من العمل الدؤوب في نظريات الهندسة اللاكميّة وأشكالها المُعقّدة. وتوصل إلى فهم يجمع المروحة الكاملة للاحتمالات في أداة التذبذب، أو ما يسميه الفيزيائيون «الفضاء الكامل للحال». وقد مثّل كل لحظة من عمل النظام في نقطة من ذلك الفضاء؛ بحيث تشير إحداثياتها إلى معلومات عن الموضع أو اللزوجة أو غيرها.

وكلما تغيّر النظام، انتقلت النقطة إلى موقع جديد في «فضاء الحال». ولأن النظام يتغيّر باستمرار، ترسم النقطة مساراً يمثّله.

وبالنسبة إلى نظام بسيط مثل رقّاص الساعة، يُشبه فضاء الحال مستطيلاً، بحيث تُحدد زاوية الرقّاص إحداثيات النقطة بالنسبة إلى نصف المستطيل، وتُحدّد السرعة إحداثياتها بالنسبة إلى النصف الآخر. وعندما يتأرجح رقّاص الساعة بانتظام، يشبه مسار تلك النقطة العُقدة البسيطة أو الأنشوطة، التي تدور وتدور ما دام رقّاص الساعة مستمراً في حركته، وتكررت أوضاعه المرّة تلو الأخرى.

وبدل ان يَنظر إلى أي مسار بعينه، ركّز سمييل تفكيره على الفضاء الكامل للحال في علاقته مع متغيّرات النظام، مثل إعطاء الرقّاص دفعات أقوى.

وعمد إلى التركيز على الجوهر الهندسي لذلك المتغيّر، بدل الاستغراق في طبيعته الفيزيائية، مستخدماً التحوّلات الهندسية اللاكميّة للأشكال المرتسمة في فضاء الحال.

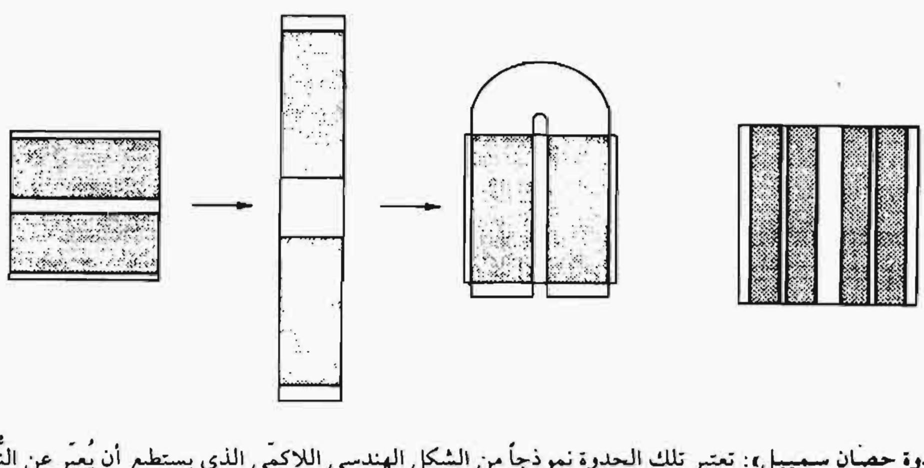


صنع البورتريهات في فضاء الحال: إن التسلسل الزمني التقليدي (في الأعلى) والأشكال المرتسمة في فضاء الحال (في الأسفل)، تعبران عن المعلومات عينها، وتُعطيان صورة عن سلوك النظام على المدى الطويل. ففي الرسمين الأولين (إلى اليسار)، يظهر النظام الذي يتجه إلى حال مستقرة، ويُصبح بمنزلة نقطة في فضاء الحال. ويليهما نظام يُكرّر نفسَه بصورة دورية، مما يرسم مداراً دائرياً. ويتبعهما نظام يُكرّر نفسه بصورة دورية منتظمة في دورات ثلاثية. ويليهما نظام عشوائي.

وشملت تلك التحوّلات أشياء مثل زيادة الطول والانضغاط. وفي بعض الأحيان، أفادت تلك التحوّلات مما يوازيها في علم الفيزياء.

وتُرجمت متغيّرات مثل حدوث حال من التبدّد في النظام، بمعنى فقدان الطاقة بالاحتكاك، على هيئة تقلّص في رسومها في فضاء الحال، كأنها بالون يفرغ من هوائه فيتقلّص إلى نقطة مفردة عند توقّفه.

كما أدرك سمييل أن التعبير عن المروحة الكاملة للتعقيد المُتضمن في التذبذبات التي رصدها فان دير بول، يقتضي أن يشهد الفضاء الكامل للحال تحوّلات مُعقّدة. وانتقل مسرعاً من التفكير في صور السلوك الكامل، إلى رسم نموذج من نوع جديد. وهكذا توصّل إلى تركيب ذاع صيته طويلاً باسم «حدوة الحصان»، ونُظِر اليه باعتباره رمزاً لفكرة الكايوس. ولتبسيط فكرة حدوة الحصان عند سمييل، خذ مستطيلاً واضغطه من الأعلى والأسفل ليصبح لوحاً أفقياً. ثم خذ أحد طرفَيّ اللوح، واثِنه ولفّه حول الطرف الآخر،



«حدوة حصان سمييل»: تعتبر تلك الحدوة نموذجاً من الشكل الهندسي اللاكمّي الذي يستطيع أن يُعبّر عن النُظُم الديناميكية المُتسمة بالعشوائية. إن أساساته سهلة: يُضغط فضاء الحال من جهة، ويتمدّد من الجهة الأخرى ثم يُثنى. وتُكرّر العملية، ما يُعطي شكلاً هلالياً يشبه كعكة الحلوى الأميركية. ويعني ذلك أن نقطتين متباعدتين في الأصل، قد تتقاربان لاحقاً، مع مرور مزيد من الوقت على عمل النظام.

فيتكوّن ما يشبه الهلال أو... حدوة الحصان. ثم تخيل أنك أدخلت تلك الحدوة في مستطيل يُشبه الذي ابتدأت العمل منه. ثم كرّر تلك العملية المرّة تلو الأخرى.

عندئذ، تصبح تلك العملية شبيهة بكعكة الحلوى الهلالية الشكل بواسطة الآلات الميكانيكية. فمع التكرار، تصبح العجينة طويلة ورفيعة ومؤلفة من طبقات متراكبة.

وقد استعمل سمييل حدوة الحصان للتعبير عن مجموعة من النُّظُم التي تتعامل معها الهندسة اللاكميّة، من دون استخدام المُعادلات الرياضية.

وأثبتت «حدوة حصان سمييل» أنها تُعبّر بصرياً، عن النُّظُم التي تتميّز بالاعتماد الحسّاس على الأوضاع الأولية، كمثل نموذج الطقس الذي صنعه لورنز بعد سنوات. عند اختيار نقطتين من «فضاء الحال»، بطريقة اعتباطية، يصعب التنبؤ بسيرورة علاقتهما لاحقاً. وقد تتباعدان، عبر عمليات الثني والمطّ، لكنهما قد تنتهيان إلى التقارب.

وفي الأصل، أمِل سمييل أن يتوصل إلى شرح كل النُّظُم الديناميكية عبر عمليات الضغط والمط، مع تجنّب الثني، على الأقل تجنّب ذلك النوع من الثني الذي قد يضرب أُسس استقرار النظام. وتبيّن لاحقاً عدم امكان تجنّب الثني، لأنه يعبّر عن التقلّبات الحادة في السلوك الديناميكي. نُظر إلى «حدوة حصان سمييل» باعتبارها الشكل الأول في مجموعة من الأشكال الهندسية الجديدة التي أعطت الفيزيائيين وعلماء الرياضيات حدساً جديداً عن الحركة واحتمالاتها. وبطريقة ما، بدت مصطنعة إلى حدّ غير عملي، لكنها شكل جديد وُلد في عالم الهندسة اللاكميّة، لذا فقد استرعت اهتمام علماء الفيزياء.

ولم تُشكّل سوى نقطة البداية. وعلى مدار ستينات القرن العشرين، جمع سمييل حوله مجموعة من علماء الرياضيات الشباب الذين شاركوه في عمله المبتكر على النُّظُم الديناميكية. وبعد عقد من السنين، لفتت أعمال هذه المجموعة الاختصاصيين في العلوم التطبيقية، بعدما أثبت سمييل أنه أعاد الهندسة اللاكميّة للتعامل مع العالم الحقيقي. ووُصف ذلك بأنه عصر ذهبي. وقال رالف أبراهام، الذي عمل مع سمييل ثم أصبح أُستاذاً للرياضيات في جامعة كاليفورنيا في سانتا كروز: «إن ما فعله سمييل شكّل انتقالاً للنموذج

في عملية انتقال النماذج العلمية... عندما شرعت في التخصص بالرياضيات عام ١٩٦٠، لم تكن الرياضيات الحديثة مقبولة كلّها من علماء الفيزياء. وبعد أقلّ من سنتين من النسبية، لم يعد علماء الفيزياء يتقبلون التحليل الرياضي الشامل والمعادلات التفاضلية الديناميكية والخرائط المتعددة الأسطح والهندسة التفاضلية. لقد انتهى الغرام بين الرياضيات والفيزياء في ثلاثينات القرن العشرين. ولم تعد إحداهما تحادث الأخرى، بل حلّ الكره بينهما. ودرج علماء الرياضيات الفيزيائية على رفض طلب تلامذتهم أن يدرسوا الرياضيات على أيدي اختصاصييها. وتشددوا في نصحهم بأخذ الرياضيات من الفيزياء، وعدم الالتفات إلى أعمال علماء الرياضيات الذين وُصموا بأنهم يشتتون أذهان العلماء الشباب. وحدث التحوّل بداية عام ١٩٦٠. وبحلول عام ١٩٦٨، كانت الأمور قد تبدّلت كلّها».

وفي نهاية المطاف، أصغى علماء الفلك والفيزياء والبيولوجيا بانتباه إلى هذه الهندسة الجديدة. فمثلاً، ثمة لغز كوني متواضع، يتمثّل في البقعة الحمراء في كوكب المشتري. وتشبه البُقعة عاصفة ضخمة، تُدَوِّم بطريقة بيضاوية، لكنها لا تتبدد. وظهرت بوضوح في الصور التي بثّتها سفينة الفضاء «فوياجر ٢» عام ١٩٧٨، متبدية بحجمها الضخم والمُضطرب. وتُعتبر من العلامات المشهورة في النظام الشمسي. ووصفها الشاعر جون أبدايك بأنها: «بقعة حمراء كعين متألمة / في اضطراب يهيّج الحواجب». لكن، ما هي تلك البقعة؟ بعد عشرين سنة من إطلاق لورنز وسمييل وغيرهما، هذه النظرة الجديدة في فهم الطبيعة، أثبت الطقس في كوكب المُشتري أنه موضع آخر لتلك النظرة التي أدخلتها نظرية الكايوس إلى العلم. فلثلاثة قرون، لم يُفض التقصي العلمي عنها إلاّ لمزيد من الغموض حولها. لقد لاحظ الفلكيون تلك اللطخة، بُعيد تأمل غاليليو للمشتري بالتلسكوب. وفي القرن السابع عشر، رآها روبرت هوك. ورسمها دوناتي كريتي على جدارية في الفاتيكان. ولم تُعط تفسيراً مناسباً، على رغم تواتر النظريات بشأنها، خصوصاً في القرن التاسع عشر، والتي شملت الآتي:

نظرية فيض الحمم البركانية: تخيّل العلماء في أواخر القرن التاسع عشر وجود بحيرة من الحمم الذائبة التي تأتي من نشاط بركاني أو من شقّ هائل في القشرة الخارجية من سطح الكوكب.

نظرية القمر الجديد: اقترح عالم فلك ألماني أن البقعة تمثّل الموضع الذي خرج منه أحد أقمار ذلك الكوكب.

نظرية البيضة: اعتمدت تلك النظرية على معطيات رصد البقعة، والتي بيّنت أنها تتحرّك عكس اتجاه المُشتري. ولذا، نُظر إلى البقعة الحمراء، عام ١٩٣٩، باعتبارها جسماً صلباً إلى حدّ ما يطفو في جو المُشتري، كما تطفو البيضة في الماء. وفي تنويع على النظرية نفسها، قال بعض العلماء إن ذلك الجسم ربما كان فقاعة من الهيدروجين أو الهيليوم.

نظرية عمود الغاز: أظهر الرصد المتواصل للبقعة أنها تتحرّك باتجاه مُحدد، لكنها لا تكمل طريقها فتبتعد.

لذا، اقترح بعض العلماء، في ستينات القرن العشرين، أنها قمة عمود من الغاز، ربّما يندفع من باطن الكوكب.

ثم جاءت المركبة «فوياجر». لقد أمِل بعض العلماء أن يُحلّ اللغز، مع الاقتراب منه. وقد أعطت صور «فوياجر» مشاهد رائعة ومعلومات جمّة، لكن ذلك لم يُزل اللغز. فقد أظهرت صور «فوياجر»، عام ١٩٧٨، رياحاً عاتية تدور في دوّامات مُلوّنة. كما ظهر أن البُقعة الحمراء وكأنها جزء من نظام إعصار مُدوِّم يرتكز على رياح تكتسح الكوكب من الغرب إلى الشرق، وتسير في خطوط طولية عبره. وبذا، باتت قريبة من وصف الإعصار كما نعرفه على الأرض، لكنها لم تكن كذلك تماماً. ومعلوم أن الأعاصير على الأرض تتغذّى من الحرارة التي تتراكم عند تكاثف الرطوبة على هيئة أمطار. ولم تُظهر صور «فوياجر» نظاماً من الرطوبة متصلاً بالبقعة الحمراء. وعلى الأرض أيضاً، تدور الأعاصير في اتجاه مُحدّد، بحيث تسير باتجاه عقارب الساعة شمال خط الإستواء، وعكسها

جنوبه. ولا ينطبق هذا الوصف على البقعة الحمراء. والأهم، أن الأعاصير تزول خلال أيام، على عكس حال بقعة المُشتري. ومع تأمل العلماء في صور «فوياجر»، تبيّن لهم أن المشتري كوكب يتحرك بطريقة سيّالة. لقد استعدوا لرؤية كوكب صخري ضخم مُحاط بغلاف جوي رقيق، كحال الأرض. لكنهم صدموا بالحجم الهائل من الغاز الذي يتألف منه الكوكب، بحيث أن قسمه الصلب، إن وُجد، سيكون «مدفوناً» في تلك الكتلة الغازية الهائلة، التي فاجأت العلماء بسيولة حركتها، مع ثبات البقعة الحمراء، وسط الفوضى الهائلة التي تتحرك حولها. لقد زاد اللغز تعقيداً. وصارت البقعة الحمراء محكّاً للنظريات العلمية.

وتبيّن أن العلماء رأوا فيها دوماً ما كانوا مستعدين لرؤيته أصلاً، كل بحسب وجهة نظره! وبذا، رأى فيها علماء الحال السيّالة في الفيزياء شيئاً مُحيّراً لأنهم لم يستطيعوا تفسير ثباتها كجزيرة في بحر من التشوّش والعشوائية. وزاد من حيرتهم أن صور «فوياجر» أظهرت أنها تتحرّك بسيولة، على المقياس الصغير جداً، والذي لا تتمكن أقوى التيليسكوبات الأرضية من رصده. وأظهرت تلك الحركة الصغيرة المقياس أنها «تتخربط» بسرعة، فتظهر التدويمات وتزول خلال يوم أو أقل. ولكن، البقعة، تبقى مكانها عموماً. فمن أين تأتي حركتها تلك؟ وما الذي يبقيها؟

احتفظت «الوكالة الوطنية (الأميركية) للطيران والفضاء» (ناسا) بصور «فوياجر» في أرشيفها، الذي يتوزع في طول البلاد وعرضها. وتستضيف جامعة كورنيل أحد تلك الأرشيفات، التي لا يزيد عددها على الستة. وفي مطلع ثمانينات القرن العشرين، عُيّن فيليب ماركوس، فلكي شاب واختصاصي في الرياضيات التطبيقية، في ذلك الأرشيف.

وعقب صور «فوياجر»، انكبّ ماركوس مع حفنة من العلماء في الولايات المتحدة وبريطانيا، على صنع نموذج عن البقعة الحمراء. وهجروا نظرية الإعصار. وبحثوا عما يُشبهها في مكان آخر. واتجهت أنظارهم إلى تيار الخليج، الذي يُطلق رياحاً عبر غرب

المحيط الأطلسي، ويتلوّى ويتشعب ولكن بطريقة ثابتة تُذكّر بما تفعله بُقعة المُشتري. كذلك يُطلق أمواجاً صغيرة، تتجمّع في موجات أكبر، ثم تتحوّل إلى حلقات تنطلق من المجرى الرئيسي لتيار الخليج، وتُدوّم ببطء لمدة طويلة، وبطريقة مغايرة لدوران الأعاصير. وفكّر ماركوس ورفاقه أيضاً في ظاهرة معروفة لعلماء المناخ اسمها «الانسداد». فأحياناً، يستقرّ نظام من الضغط المُرتفع بعيداً من الشاطئ، ويدور ببطء، لأسابيع أو شهور، مُخالفاً مساره الاعتيادي من الشرق إلى الغرب. وكثيراً ما أفشل الانسداد توقّعات الطقس، لكنه يُعطي الاختصاصيين بعض الأمل في التنبؤ بأحوال الطقس لأيام طويلة، بأثر من ثباته.

وتمعّن ماركوس وزملاؤه في صور «فوياجر» وفي صور الهبوط على القمر. واستناداً إلى قوانين نيوتن في الفيزياء، صنع ماركوس كومبيوتراً متخصّصاً في معادلات السوائل وما يُشبهها كالهواء. ولمحاكاة حال الطقس على المُشتري، أدخل إليه قوانين عن كتلتي الهيدروجين والهيليوم عندما يكونان في حال الكثافة العالية، أي كما يكون الحال في شمس قبيل اشتعال فرنها الهائل. وشرع الكومبيوتر في تقليد دوران المُشتري، بحيث يُختصر اليوم في المشتري إلى عشر ساعات في الحاسوب. وتبيّن أن الدوران يولّد قوة من نوع خاص، عُرفت باسم «قوة كوريوليس»، وتُشبه ذلك الشعور بالانزلاق عند السير على أرض زلقة. وبدا أن «قوة كوريوليس» هي ما يدفع بالبقعة. وعلى غرار «دمية الطقس» التي اصطنعها لورنز على حاسوبه المتواضع، استخدم ماركوس كومبيوتره للحصول على صور مُلوّنة عن الطقس في المُشتري. وفي البداية، ظهرت صور غير واضحة، ولا تكاد تظهر فيها الخطوط العامة.

وجمع ماركوس الصور في شرائح ضوئية، ثم راكم بعضها فوق بعض، وعرضها على نحو متتابع كأنها فيلم رسوم متحركة. والتمع الإلهام. فقد ظهرت من تلقائها، في هذا الفيلم الذي يُحاكي طقس المُشتري رقمياً، بقعة حمراء تُشبه تلك التي تُشاهد في المُشتري. وبحسب ما أوضح ماركوس: «تظهر تلك البقعة الكبيرة ثابتة، ويحيط بها الكثير

من الفوضى على المقياس الصغير. وتمتص الفوضى الطاقة مثل الإسفنجة». لقد استطاع ماركوس أن يُبرهن أن البقعة الحمراء على المُشتري تُشكّل نظاماً متكاملاً، تُشكّله التعرّجات اللاخطية وتُنظّمه، لكنها تولّد أيضاً حركة عشوائية حولها. إنها فوضى مستقرة.

في الجامعة، درس ماركوس الفيزياء التقليدية، وحلّل المُعادلات الخطيّة، وأجرى تجارب تتوافق مع التحليل الخطي. ولم يحرّضه أحد على محاولة التأمل في المُعادلات اللاخطية، التي تتحدى العقول.

ونتيجة بقاء أعماله ضمن التقريب الذي تستلزمه تلك المُعادلات، حصل على الأجوبة التي يتوقّعها أساتذته. ولكن، عندما واجه العالم الواقعي، حيث يغيب التقريب، توصّل ماركوس إلى ما عرف لاحقاً أنه يندرج في إطار نظرية الكايوس. لم يعد يعتبر أن الهنات الصغيرة لا تستحقّ التفاتاً، لأن من الممكن تجاوزها بواسطة أسلوب التقريب.

ولكنه سار في وجهة مُغايرة، ليصل، في نهاية الأمر، إلى تعلّم أمثولة لورنز، وليدرك أنه حتى الأنظمة الحتمية في إمكانها أن تُنتج ما هو أكثر من مجرّد سلوك دوري منتظم. وتعلم أن يواجه الاضطراب، وأن يبحث عن جُزر من الانتظام وسط بحر من الفوضى. وبذا، فكّر في مسألة البقعة الحمراء من منظار يعتبر أن النُّظُم المُعقّدة في إمكانها أن تُعطي فوضى وانتظاماً في الوقت عينه. وبذا، استطاع أن يساهم في علم صاعد، وفي استعمال الكومبيوتر كمختبر. ومال إلى اعتبار نفسه جزءاً من نوع جديد من العلماء. لم يعد يعتبر نفسه فلكياً، بل باحثاً في ديناميكيات الحال السائلة. ولم يبقَ اختصاصياً في الرياضيات التطبيقية، بل صار متخصصاً في نظرية الفوضى.

تقلبات الحياة

يجب أن يُختبر تطوّر الرياضيات من طريق مقارنته بالحدس العادي حول ما يُشكل سلوكاً بيولوجياً مقبولاً. وعند ظهور فروق بين الأمرين، يجدر التفكير في الاحتمالات الآتية:

أ ــ حدث خطأ في تطوّر الرياضيات؛

ب ــ إن الافتراضات الأولية لم تكن صحيحة و/أو أنها كانت مُبسّطة أكثر من اللزوم؛

ت ــ إن الحدس عن السلوك البيولوجي لم يكن متطوّراً تطوراً كافياً؛

ث ــ إن مبدأ جديداً في شرح الأمور قد اكتُشِف.

هارفي ج. غولد

«النمذجة الرياضية للنُّظُم البيولوجية»

سمكٍ شرِه وعوالق مائية شهية. تكتظ غابات المطر الاستوائية بزواحف لا حصر لها، وبطيور تحلّق تحت الأشجار الكثّة الأوراق، وبالحشرات التي تطلق أصواتاً تُشبه المصاعد الكهربائية. إنها أحزمة الغابات، حيث تتكاثر فئران الحقل والقوارض القصيرة الذيل، قبل أن تتضاءل أعدادها دورياً كل أربع سنوات، نتيجة الصراع الضاري على البقاء. إنه مختبر طبيعي ومُشوّش للبيئة الأرضية، حيث يتفاعل خمسة ملايين نوع من الكائنات الحيّة؛ أو ربما خمسون مليوناً منها. من يدري؟ حتى اختصاصيو البيئة يجهلون الإجابة.

في القرن العشرين، توصّل بعض علماء البيولوجيا ممن يتميّزون بميلهم للرياضيات، بغية صوغ حقل معرفي، الأيكولوجيا (علم البيئة)، الذي يزيل التشوّش والتلوّن من الحياة الطبيعية ليتعامل مع المجموعات الحيّة باعتبارها نظاماً ديناميكياً. لقد استخدم علماء الأيكولوجيا أدوات أساسية اقتبسوها من الفيزياء الرياضية ليصفوا تقلّبات الحياة. وبذا، استطاع مُنظّرو البيولوجيا أن يدرسوا أوضاعاً مثل تكاثر نوع ما في مكان محدود المصادر غذائياً، وتصارع الأنواع على البقاء، وانتشار الأوبئة في التجمعات الحيّة.

ومع صعود نظرية الكايوس في سبعينات القرن العشرين، تصدّى بعض علماء الأيكولوجيا لمهمة من نوع خاص. واستعملوا النماذج الرياضيَّة، لكنهم علموا دوماً أنها تتضمّن تقريبات كثيرة عمّا تكونه الأمور فعلياً في الطبيعة. وبطريقة ما، عرفوا أن معارفهم تقريبية مما سمح بإدراك أهمية بعض الأفكار الرياضية الجديدة التي نادت بضرورة الاهتمام بالأشياء النافرة وغير المنسجمة مع القاعدة العامة. وأثارت اهتمامهم قدرة المُعادلات المنتظمة على صنع سلوك غير منتظم.

إن المُعادلات التي يمكن تطبيقها على مجموعة من الكائنات الحيّة، كانت نظيراً بدائيّاً للنماذج التي استعملها الفيزيائيون لدرس أشياء الكون.

ولكن التعقيد الذي تتضمّنه الظاهرة الحيّة يفوق كل ما قد تتخيّله فيزياء المختبرات. وبذا، مالت النماذج الرياضيّة عن البيولوجيا لأن تكون «كاريكاتوراً» عن الواقع، على غرار ما كانه الأمر عينه في الاقتصاد والديموغرافيا والطب النفسي والعمران المديني وغيرها من العلوم «الناعمة»، التي حاولت الأخذ بالمُعادلات الصارمة للرياضيات التقليدية وتطبيقها على ميادينها المتعددة. وبدت المعايير متفاوتة دوماً. فبالنسبة إلى الفيزياء، تعتبر مُعادلات كتلك التي عمل عليها لورنز في «دُمية الطقس» مُعقّدة بطريقة ملحوظة، لكنها تبدو مُبسّطة بشدة في ميدان البيولوجيا. وحفّزت الحاجة البيولوجيين لاختراع أسلوب مُغاير. وتعيّن عليهم صوغ رؤية مختلفة للعلاقة بين الواقع والمُعادلات الرياضية. فتقليدياً، ينظر الفيزيائي إلى نظام معيّن (مثل رقّاصين مربوطين بزنبرك) ثم يختار المُعادلات التي تفيده في وصف ما يراه. ويُفضل العمل النظري الذي يمكّنه من الانطلاق من القوانين الأولية. ويعمل على مُعادلات الرقّاص والزنبرك للتوصل إلى استنباط حلول لذلك النظام المؤلف منهما.

وعلى عكسه، لا يستطيع اختصاصي البيولوجيا استنباط المُعادلات المُناسبة بمجرد التفكير النظري في نوع معيّن من الحيوانات. وينبغي له أن يجمع المعلومات أولاً، ويُحاول البحث عن المُعادلات التي قد تكون مناسبة لها. ما الذي يحدث عندما تضع ألف سمكة في حوض محدود الموارد؟ ما الذي يحدث إذا أُضيف إليها ٥٠ سمكة قرش تلتهم كل منها سمكتين يومياً؟ ما الذي يحدث عندما ينتشر فيروس يقضي على نسبة مُعينة ممن يصاب به؟ لقد ابتكر العلماء بعض المُعادلات النموذجية عن تلك الأوضاع، لمحاولة التوصّل إلى الإجابات المناسبة. وكثيراً ما نجحوا. ولا يعلم البيولوجيون سوى القليل عن تاريخ الحياة على الأرض، وكيف سارت الأمور بين الضواري الملتهمة التي ملأت الأرض سابقاً وبين ضحاياها؛ وكيف تغيّر عدد السكان في بلد ما نتيجة أحد الأوبئة. إن صوغ

نماذج رياضية عن تلك الأوضاع يساعد علماء البيولوجيا في الحصول على فكرة عن مسارها فعلياً. وقد صُنع نموذج مُبسّط لدرس مثل تلك الأحوال، عبر تقسيم تاريخ العالم إلى مراحل منفصلة، كالساعة التي يقفز عقربها من ثانية إلى أُخرى.

وتُفيد المُعادلات التفاضلية في وصف العمليات التي تسير باتساق عبر الزمن، لكن حساباتها ليست يسيرة. ثمة مُعادلات أكثر بساطة، تُسمّى «مُعادلات الفارق»، التي تتخصَّص في درس العمليات التي تقفز من حال إلى أخرى. ولحسن الحظ، فإن أنواعاً كثيرة من الحيوانات تتكاثر سنوياً. إن التغيّرات السنوية أكثر أهمية من تلك التي تحدث على نحو متواصل. وعلى عكس البشر، فإن الحشرات، مثلاً، تتكاثر في فصل بعينه، بحيث لا تتداخل أجيالها. ولكي تُخمّن أعداد الفراش الغجري، أو عدد إصابات الحصبة، في العام المُقبل؛ يكفي معرفة أعدادها لهذه السنة.

يُعطي التغيير المنتظم سنوياً صورة مُبسّطة عن تعقيد النُّظُم الطبيعية، لكنه مفيد أيضاً في كثير من الحالات. ومقارنة برياضيات ستيفن سمييل، تبدو رياضيات البيولوجيا مثل الوصايا العشر بالنسبة إلى التوراة، بمعنى أنها مبادئ أساسية لكن لا تُعطي الصورة الكليّة المُركّبة.

فلوصف التغيير السنوي في أعداد مجموعة من الكائنات، يستعمل البيولوجيون مُعادلات تُشبه تلك التي يدرسها طُلاب المرحلة الثانوية. لنفترض أن عدد الفراش الغجري يعتمد كلياً على عددها لهذا العام. يمكن صنع جدول مُحدَّد لتكاثرها لمجموعة من السنين. ويمكن أيضاً وصف العلاقة بين أعدادها هذا العام وأعدادها في السنين المقبلة عبر مُعادلة، بمعنى أنها تُمثّل «دالة»، بالمصطلح الرياضي. ومن المستطاع رسم الدالة في خط بياني يعطي فكرة عن الصورة العامة للوضع. ولتتبع التغيّر في المجموع، في نموذج بسيط كهذا، لا يلزم سوى تجسيده في خط بياني ثم تكرار العملية المرة تلو المرة. ويمكن استحضار تاريخ المجموع عبر عملية تكرارية، تغذّي فيها مُعطيات كل سنة المُعادلة نفسها، فتدور الدورة ثانية، وتظهر توقّعات السنة التي تليها لكي تُغذّي صورة

السنة التي تليها أيضاً وهكذا دواليك. ويُسمّى ذلك عملية «التغذية الراجعة». يمكن أن تخرج هذه العملية عن السيطرة، خروجاً يُحدث إرباكاً في التوقّع.

كما تقدر التغذية الراجعة على إحداث حال من الاستقرار، فتصبح مثل ضابط الحرارة «ترموستات» المُكيف، يخفض الحرارة إذا تجاوزت نقطة معينة، ويتركها لتسخن إذا نزلت عن تلك النقطة أيضاً. ثمة أنواع من الدوال الرياضية. يتمثّل المقترب البيولوجي الأشد بساطة في دالة ترفع أعداد مجموعة حيّة سنوياً، مما يُعتبر معادلة خطيّة مباشرة، فتقود إلى نوع من التوقّع المبالغ به للنمو السكاني، لا يأخذ في الاعتبار محدودية مصادر الغذاء ولا الاعتبارات الأخلاقية والثقافية، لكنه يقيس معدل النمو. لنفترض أن عدد السكان للعام الراهن هو عشرة، وأن معدل الزيادة هو ١,١، فيصبح عدد السكان بعد عشرين ألف سنة ٢٢ ألفاً. وبذا، يستمر عدد السكان بالتصاعد إلى ما لا نهاية.

ومنذ آجال، أدرك علماء الأيكولوجيا أن الأمور ليست بهذه البساطة، وسعوا لابتكار وسائل رياضية أكثر تقدماً. إذا فكر عالم أيكولوجيا في سمكة حقيقية تعيش في حوض حقيقي، فعليه أن يُفكر في إيجاد دالة تُعبّر عن وقائع مثل الجوع والتنافس. وعندما يتكاثر السمك، تشرع مصادر غذائه في النضوب. لذا، فإن مجموعة صغيرة من السمك تتكاثر بسرعة، فيما تسير المجموعة الضخمة في درب التناقص. لنأخذ مثال الخنفساء اليابانية. في الأول من آب (أغسطس)، تضع مواليدها. وعندئذ، يمكن إحصاء عددها مع التنبّه إلى مصادر غذائها. ولكي لا تتعقّد العمليات الحسابية كثيراً، نستطيع تجاهل الطيور التي تعيش حولها والأمراض التي تُصيبها. في امكان المجموعة الصغيرة من الخنافس أن تتكاثر بحرية. لنفترض أن عددها وصل إلى حد أنها احتاجت إلى التهام الحديقة التي تعيش فيها، إذ ذاك ستتضور جوعاً. في السيناريو الشهير الذي طرحه جون مالتوس، يتزايد السكان إلى ما لا نهاية. لكن يبدو سيناريو مالتوس غير عملي بالنسبة إلى عالم أيكولوجيا، فيحتاج إلى مُعادلة رياضية تصف أيضاً العلاقة بين السكان ومصادر الغذاء، بحيث تلجم الزيادة في السكان عندما يصبح المجموع كبيراً. إذاً، يمكن اختيار دالة قريبة

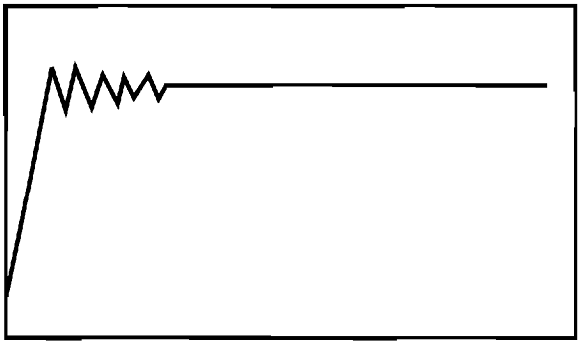
من الوضع الطبيعي بحيث ترتفع باستمرار عندما يكون عدد السكان قليلاً، ثم تنخفض عندما يكبر ذلك العدّد. وبتكرار هذه العملية، من الممكن رؤية السلوك الذي يصل إليه الجمع السكاني على المدى الطويل؛ فالأرجح أن يصل الأمر إلى حال ثابتة. وللتعبير عن تلك الصورة رياضياً، يتعيّن على عالم الأيكولوجيا أن يتوصل إلى معادلة تضم مجموعة من المتغيّرات، مثل عدد السكان، ومعدل التكاثر، ونسبة الوفيات، وقتلى الحروب والمجاعات. وبذا يتوصل إلى معادلة تُظهر نسبة الزيادة في السكان التي تصل بهم إلى حال من الاستقرار والتوازن.

ومن الناحية الرياضية، يمكن الوصول إلى تلك المُعادلة من خلال تعديل في صيغة المُعادلة المالتوسية. وعندئذ يمكن الانطلاق من العدد الراهن للسكان، والتنبؤ بعدد السكان للعام المقبل.

وفي خمسينات القرن العشرين، نظر عدد من الأيكولوجيين في المتغيّرات التي تتضمنها تلك المعادلة اللامالتوسية، والتي تُسمى معادلة «الفارق اللوجستي». ففي أستراليا مثلاً، طبّق العالِم دبليو إي رايكر، تلك المعادلة على مصائد الأسماك.

وقد علِمَ الأيكولوجيون طويلاً أن مُعدّل التكاثر يعتبر متُغيّراً مهماً في صوغ المُعادلات عن عدد الأسماك في المصائد. ففي عالم المادة الفيزيائية الجامدة، التي استقيت منه تلك المُعادلة أصلاً، ثمة ما يشبه هذا العنصر المُتغيّر مثل كمية الحرارة، أو كمية الاحتكاك أو ما يُشبههما. وبالاختصار، إن هذا المُتغيّر هو من النوع اللاخطي. وفي بحيرة، فإن المتغيّر اللاخطي قد يكون في قدرة الاسماك على التلاقح، أي قدرة المجموعة على الازدهار والانحدار، وهذا ما يُسمى تقنياً «القدرة البيولوجية». وبرز سؤال عن الطريقة التي تؤثر فيها تلك المؤشرات في الكثافة المُتبدّلة للسكان. وفي الإجابة أن القيمة الدنيا من المؤشر تجرّ المجموع السكاني إلى مستوى أدنى، فيما تقودها القيمة الأعلى إلى حال مستقرة على مستوى أعلى. وينطبق الوصف على مؤشرات عدّة، لكن ليس كلها.

ففي أحيان كثيرة، جرّب باحثون مثل رايكر مؤشرات أشد علوّاً، فرأوا ما يُشبه



يصل عدد السكان إلى الاستقرار بعد ارتفاع وانفجار ثم تراجع.

الكايوس. فقد لاحظوا أن الأرقام تتصرف بطريقة غرائبية. صحيح أنها لم تستمر في الارتفاع على الطريقة المالتوسية، لكنها لم تتوصل إلى حال من الاستقرار أيضاً. ولم يتمكَّن علماء الأيكولوجيا، قبل ظهور نظرية الكايوس، من التعامل مع ذلك النوع الغرائبي من الأرقام. وافترضوا أن عدد السكان يتقلّب، صعوداً وهبوطاً، عند مستوى قريب من حال التوازن. ولم يخطر ببالهم أن التوازن ربما لا يوجد البتة.

إن الكتب والمصادر التي تعاملت مع مُعادلة الفرق اللوجستي، والتي ولدت منها مُعادلات أشد تعقيداً، لم يتوقعوا السلوك الفوضوي.

ففي مؤلفه الكلاسيكي «أفكار رياضية في البيولوجيا» (١٩٦٨)، أعطى مينارد سميث فكرة نموذجية عن الامكانات التي تداولها العلماء، مثل القول إن المجموعات غالباً ما تبقى ثابتة، أو تتقلب «بمعدل شبه دوري» حول نقطة مُفترضة تُمثّل التوازن. بالطبع، لم يكن ساذجاً إلى حدّ الاعتقاد بأن مجموعات السكان قد لا تتصرف بعشوائية فعلياً. لكنه افترض، ببساطة، أن السلوك العشوائي ليس من النوع الذي يمكن تمثيله في نماذجه الرياضية. فعندما لا تطابق النماذج الوقائع، يُرجع الأمر إلى غياب المعلومات الكافية عن ملمح ما مثل توزّع السكان عبر الفئات العمرية، أو الاعتبارات الجغرافية والمناطقية، أو توزّع السكان بين الجنسين.

فحينذاك، أولى علماء الأيكولوجيا جلّ اهتمامهم إلى الحلول التي تقود إلى

الاستقرار. وأرجعوا عدم بلوغه إلى حدوث خطأ ما. مثل النظام المُتضمّن في الاستقرار مُكافأة في ذاته. وفي المقابل، شكل البحث عن مُعادلات مناسبة، وبغض النظر عن تعقيدها، للتعبير عن السلوك الواقعي للأشياء، عملية مضنية. فمن يبذل كل ذلك الجهد للوصول إلى خط من النتائج لا تؤدي إلى الاستقرار؟ وفي المقابل، لم ينس الأيكولوجيون أن معادلاتهم لا تعكس إلا صورة مُبسّطة عن الواقع. ويرمي ذلك التبسيط إلى جعل النموذج مستقراً.

لاحقاً، شاع القول إن جايمس يورك أعاد اكتشاف لورنز، وأنه أعطى الكايوس ذلك الاسم. والحقيقة أن الشق الثاني من ذلك القول صحيح. لقد اعتاد يورك، وهو عالم رياضيات، أن ينظر إلى نفسه كفيلسوف. كان لامعاً وطلق اللسان، ويحمل إعجاباً مُضطرباً بستيفن سمييل. صحيح أنه، كالكثيرين، وجد صعوبة في شرح أعمال سمييل. وصحيح أيضاً أنه، وعلى عكس كثيرين، توصل إلى فهم سبب تلك الصعوبة. فعند بلوغه الثانية والعشرين، انضمّ يورك إلى معهد للدراسات المُتعددة الاختصاصات في جامعة ماريلاند، حمل اسم «معهد علم الفيزياء وتكنولوجياتها». وقد ترأسه لاحقاً. مال يورك إلى إيجاد صلة بين أعماله في الرياضيات والواقع العملي.

وأشرف على تقرير يصف انتشار مرض السيلان (أحد الأمراض المنقولة بالجنس) بحيث أقنع الحكومة الأميركية بتغيير استراتيجيتها في مكافحته. وقدّم إفادة رسمية لولاية ماريلاند، إبّان أزمة النفط في سبعينات القرن العشرين، مُحاجّاً عن صواب (لكن من دون إقناع) بأن أسلوب المُداورة بين الأرقام المزدوجة والافرادية في تزويد السيارات بالوقود لا يحلّ المشكلة، بل يفاقم الطوابير. وفي ذروة التظاهرات المُناهضة للحرب الفيتنامية، نشرت الحكومة صورة تُظهر أن تلك التظاهرات لم تضم سوى حفنة من الناس. فحلّل يورك الظلال في تلك الصورة، ليبرهن أنها التقطت بعد نصف ساعة من انفضاض التظاهرة! وفي «معهد علم الفيزياء وتكنولوجياتها»، قضى كثير من الأوقات في حلّ مشكلات تخرج عن الاهتمام الأكاديمي الصرف. وكثيراً ما اتصل بعلماء من اختصاصات مختلفة.

وتعرّف إلى عالم مُتخصّص في ديناميات الحالات السائلة ومُغرم بورقة لورنز «التدفق غير الدوري المُحتم» التي كُتبت في العام ١٩٦٣، بحيث أنه درج على إعطاء نسخة منها لكل من أراد الاطلاع عليها. وسلّم يورك نسخة منها في العام ١٩٧٢. ولعينَي يورك، بدا بحث لورنز سحراً طال البحث عنه. لقد شكّلت صدمة رياضية لأنها رسمت نظاماً فوضوياً يهدم فكرة نظام سمييل حول التصنيف. ولم تكتف بالرياضيات، بل تضمّنت ورقة لورنز أيضاً نموذجاً فيزيائياً فائق الحيوية عن حركة السيول، أدرك يورك، بصورة فورية، أنه يمثّل ما يسعى الفيزيائيون إليه حقاً. لقد قاد سمييل الفيزياء إلى نوع مماثل من النماذج، لكن لغة الرياضيات عوّقته فلم يتمكن من التوصّل اليه فعلياً. وعلى الرغم من أن عمل سمييل على النُّظُم الديناميكية أتاح تقريب المسافة مُجدّداً بين الفيزياء والرياضيات، فلم يلغِها كليّاً، فظل كلّ محتفظاً بلغته. وكما لاحظت الفيزيائية موراي غيلمان: «لقد ألِف الأكاديميون رؤية فيزيائيّ يبدو مهتماً بالرياضيات أو عالم رياضيات يظهر وكأنه متمرس بالفيزياء... لكنهم لم يرغبوا فيهما!» لقد بدت معايير العلمين متباينة. فللفيزيائي مقولاته، ولعالم الرياضيات مسلّماته. إن الأشياء التي تصنع العلمين كليهما مختلفة.

اهتم سمييل بأمثلة من نوع: لنأخذ عدداً، وليكن كسراً عشرياً، ولنضاعفه؛ ثم نحسم منه العدّد الصحيح ثم نُكرر العملية. ما الذي يحدث؟ خلال هذه العملية، يظهر الكثير من الكسور التي تمتد إلى عدد كبير من الخانات بعد الفاصلة، لذا فإنها تُعطي تسلسلات غير متوقّعة من الأرقام. وقد يرى فيزيائي تقليدي في المثال سفسطة رياضية شديدة التجريد وعديمة الفائدة. وفي المقابل، ثمة حدس عند سمييل يدفعه لاعتبار مثل تلك المسائل جوهرية في نظر الفيزياء. فبالنسبة إلى فيزيائي تقليدي، إن المثال المُجدي يتمثّل في معادلة تفاضلية يمكن تحليلها لكي تُكتب بطريقة مُبسّطة.

وعندما رأى يورك ورقة لورنز، مع أنها دُفنت طويلاً في مجلة عن الطقس، عرف فوراً أنها المثال الذي يتحتّم على علم الفيزياء استيعابه.

ولذا، أعطى يورك سمييل نسخة من عمل لورنز، مع مُربع في أعلاها يتضمن طلب

إعادتها بعد الانتهاء منها. وذُهل سمييل أن اختصاصياً في الطقس، اكتشف قبل عشر سنوات، نوعاً من الفوضى افترض سمييل طويلاً أنها مستحيلة. وسرعان ما صنع سمييل نُسخاً من ورقة لورنز «التدفق غير الدوري المُحتم» ووزعها، مما أثار جدالاً حول إعادة اكتشاف لورنز على يد سمييل. إن كل نسخة تداولتها الأيدي في جامعة بيركلي ظهر في أعلاها المُربع الذي كتبه يورك طالباً من سمييل إعادة تلك الورقة إليه.

أحس يورك بأن الفيزياء قد تعلّمت ألا تلتقط الفوضى وألا تراها. ففي الحياة اليومية، تنتشر نماذج عن مقولة لورنز في شأن الاعتماد الحسّاس على المُعطيات الأولية، في كل مكان. يغادر رجل منزله متأخراً ثلاثين ثانية، فتخطئه آنية زهور سقطت سهواً من شرفة بمسافة لا تزيد على بضعة ميلليمترات، ثم تصدمه شاحنة.

لنكن أقل درامية، يتأخّر الرجل عن الباص الذي يمر كل عشر دقائق ويوصل إلى محطة ينطلق منها قطار في كل ساعة. يخرج رجل من منزله متأخراً ثلاثين ثانية، فيصل إلى عمله، بالقطار، متأخراً ساعة. إن الاضطرابات الطفيفة في جدول الأعمال اليومي تؤدي إلى نتائج كبيرة. لكن، للعلم شأناً مختلفاً.

من الناحية التربوية، درج الكثيرون من الفيزيائيين ومن علماء الرياضيات على كتابة مُعادلات مختلفة على اللوح الأسود، وأن يعلّموا طلابهم طُرُقاً مختلفة لحلها. تُمثّل المُعادلات التفاضلية الاستمرارية فعلياً، أي ذلك الانتقال السلس من مكان إلى آخر ومن وقت إلى آخر، من دون انقطاع. ويصعب التعامل مع المُعادلات التفاضلية. ومنذ قرنين ونصف القرن، راكم العلماء الكثير من المعرفة عنها. وتتوافر كتب ومؤلفات عن المُعادلات التفاضلية، تظهر فيها سُبل مختلفة لحلها أو بالأحرى «للعثور على شكل مقفل من العدد الصحيح»، بالمصطلح العلمي. ليس من المبالغة القول إن العمل الضخم في «علم التفاضل والتكامل» مكّن العلم من تجاوز مستوياته في القرون الوسطى؛ وهذا ما جعله أحد أهم الالتماعات العبقرية في مسار سعي العقل البشري لصنع نموذج عن العالم الذي يعيش فيه. لذا، فعندما يتوصل عالِم ما للسيطرة على طريقة تفكيره في الطبيعة

بحيث يتأقلم مع النظرية والممارسة الصعبة، يُرجّح أنه غَفل عن حقيقة مهمة هي أن مُعظم المُعادلات التفاضلية لا يمكن حلّها البتة!

وبحسب تعبير يورك: «إذا أمكنك كتابة حل لمعادلة تفاضلية، فإنها بالضرورة ليست فوضوية... لأن كتابة الحل يعني أنك وجدت متغيّرات منتظمة، أي أشياء تحافظ على نفسها، مثل قوة الدفع بالزاوية... يمكن العثور على كثير من تلك الأشياء، مما يسمح لك بكتابة حل ما. لكن ذلك بالضبط ما يُخرجك من الطريق التي توصلك إلى ملاحظة الكايوس».

تميل الكتب للاحتفاء بالنُّظُم التي يوجد حلول لها. وعند ظهور نُظُم لاخطيّة، يستعيض العلماء عنها بالتقريبات الخطيّة، أو غيرها من السُبُل الملتوية.

تعرض الكتب للطلبة تلك النماذج النادرة عن المُعادلات اللاخطية القابلة للحل. ولا تلمس تلك الكتب مسائل مثل الاعتماد الحسّاس على المُعطيات الأولية. وبذا، قلّما دُرِّست النُّظُم اللاخطيّة التي تحتوي على الكايوس. وقد تظهر تلك النُّظُم مُصادفة، لكن النظام التعليمي يحض على تجاهلها باعتبارها نشازاً. وتتذكر فئة قليلة من الباحثين أن النُّظُم الخطيّة، المنتظمة والقابلة للحل هي التي تُمثّل النشاز. وبقول آخر، فإن قلة تفهم أن الطبيعة غير خطيّة في جوهرها. وذات مرّة، لاحظ الفيزيائي انريكو فيرمي الذي قاد فريق العلماء لاختراع القنبلة الذريّة، أن: «الكتاب المُقدّس لا ينص على أن الطبيعة يمكن التعبير عنها بالمعادلات الخطيّة وحدها». كما أشار عالم الرياضيات ستانسلو أولام إلى أن تسمية علم الكايوس «علم لاخطي» يُشبه تسمية علم الحيوان: «علم الحيوانات التي لا تُشبه الفيل!» والمعنى المقصود أن معظم الحيوانات لا تُشبه الفيل.

لقد فهم يورك ذلك. وعبّر عنه بالقول: «الرسالة الأولى هي أن الاضطراب موجود. يرغب الفيزيائيون وعلماء الرياضيات في اكتشاف الأشياء المنتظمة. ويتساءل عامة الناس عن جدوى الاضطراب. وينبغي درس الاضطراب كضرورة للتعامل معه... إن ميكانيكي السيارات الذي لا يعرف شيئاً عن تراكم الوسخ في الصمامات ليس ميكانيكياً جيداً».

ومال يورك للاعتقاد بأن العلماء، كغيرهم، يُخطئون بشأن التعقيد لأنهم ليسوا مهيئين لملاحظته. لماذا يُصرّ المستثمرون على الحديث عن دورات في أسعار الذهب والفضة؟ لأن الأشياء التي تحدث دورياً تمثّل سلوكاً أكثر تعقيداً مما نتخيّل. وعندما يواجه المتخصصون أنماطاً مُعقّدة من تقلبات الأسعار، يشرعون في البحث عن شيء ما دوريّ مختبئ في ركام تلك الأرقام. ولا يختلف الأمر لدى العلماء المهتمين بالتجارب. وكذلك تحدث يورك عن أن: «في الماضي، لاحظ كثيرون السلوك الفوضوي في ما لا يُحصى من الأشياء... فكثيراً ما خرجت تجاربهم عن المألوف ثم حاولوا تجاوز الأمر، ناسبين السلوك الناشز إلى التشوّش، أو إلى سوء التجربة!»

أيقن يورك أن عمل لورنز يحمل مغزى معيناً، وأن الفيزيائي سمييل لم يلتقطه. ولذا، كتب ورقة علمية إلى «مجلة الرياضيات الأميركية» إحدى أكثر المجلات توزيعاً في أوساط علماء الرياضيات. وإضافة إلى أهميتها، فإنها حملت عنواناً جريئاً ومُحيّراً: «الدورة الثالثة تعني الكايوس». ونصحه زملاؤه أن يختار عنواناً أكثر عقلانية، لكنه أصرّ على الكلمة التي تحوّلت إلى علم عن حتمية الفوضى. وقد ناقش تلك المفاهيم مع صديقه روبرت ماي، وهو اختصاصيّ في البيولوجيا.

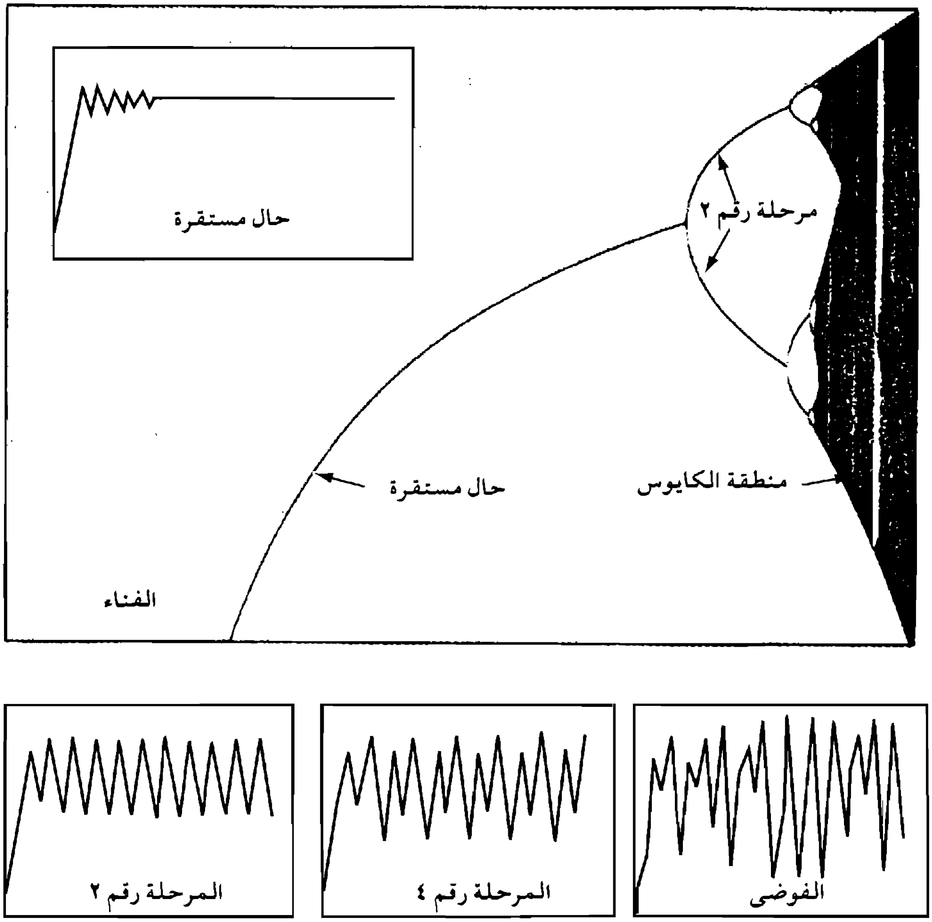
دلف ماي إلى علم البيولوجيا من الباب الخلفي. فقد ابتدأ اختصاصياً في الفيزياء النظرية في جامعة سيدني، في موطنه الأسترالي. وكان ابناً لمحام بارع. ونال دكتوراه في علم الرياضيات التطبيقي في هارفارد. وفي العام ١٩٧١، عمل سنة واحدة في «معهد الدراسات المتقدمة» في جامعة برنستون؛ حيث تعرّف عن كثب إلى علم البيولوجيا. وإلى الآن، لا يهتم كثير من علماء البيولوجيا بالرياضيات. والمعلوم أن الأشخاص الميالين إلى الرياضيات يرغبون في درس الرياضيات أو الفيزياء، وليس علوم الحياة. وشكّل ماي استثناءً. ففي البداية، شُغل بالعمل على مسائل مُجرّدة عن الاستقرار والتعقيد، أي الرياضيات التي تشرح الطُرُق التي تتيح تعايش المتنافسين. وسرعان ما جذبته الأسئلة البسيطة في الأيكولوجيا مثل التقلّب في عدد السكان بمرور الوقت. ولم يتقبّل النماذج

المُبسّطة عن تلك المسألة. وعندما انضم بصورة نهائية إلى جامعة برنستون، وأصبح لاحقاً عميداً للبحوث فيها، أنفق أوقاتاً طويلة في درس إحدى مُعادلات الفرق اللوجستي، مستخدماً التحليل الرياضي وآلة حاسبة بدائية. وتذكر أنه، ذات مرّة، كتب في سيدني تلك المُعادلة مُقدّماً إياها كمعضلة للخريجين. وسرعان ما تحوّلت إلى أرق مستمر. «ما الذي يحدث عندما يتضخم تجمع لحيوان اللاما إلى أكثر من الحد الأقصى لتجمعاته؟»

يُشبه ذلك السؤال عما يحدث عندما يتجاوز نمو السكان، مع تقلّباته صعوداً ونزولاً، النقطة الحرجة. وقد وجد ماي أن إعطاء قيم مختلفة لهذا المؤشر، يؤدي إلى التلاعب بالنظام برمته. فقد أدى ارتفاع المؤشر إلى زيادة في نسبة اللاخطيّة في النظام، مما أدى بدوره إلى تغيير النتائج كمّاً ونوعاً. وأثّرت على توازن عدد المجموع، إضافة إلى إمكان الوصول إلى التوازن أصلاً!

وعندما انخفض ذلك المؤشر عينه، رسا نموذج ماي عند حال مستقرة. لدى ارتفاع المؤشر، تفككت الحال المستقرة، وراح عدد المجموع يتأرجح بين رقمين متناوبين. وعندما ارتفع المؤشر بحدّة، أخذ النظام برمته يتصرف بطريقة عشوائية. ولم يعد من الممكن توقّع العدد التالي. فلماذا؟ ما الذي يحدث عند وصول أنواع من السلوك إلى الحدود القصوى؟ لم يستطع ماي الإجابة عن تلك الأسئلة في أستراليا، كما أعجزت الإجابة الخريجين.

وفي برنستون، انخرط ماي في استقصاء عددي مُكثّف عن سلوك تلك المُعادلة البسيطة. ووضع برنامجاً لذلك الاستقصاء، يُشبه الذي توصّل إليه سمييل، لأنه حاول أن يفهم تلك المُعادلة البسيطة بصورة شاملة، مع عدم الاكتفاء بالفهم الضيّق لها. لقد كانت مُعادلة بسيطة إلى حدّ كبير، لكن العلماء لم يستنزفوا احتمالاتها سابقاً. لقد شكّل برنامج ماي نقطة البداية. وبعدها، تقصى مئات القيم من ذلك المؤشر عينه، وراقب النتائج بانتباه، مُركزاً على احتمال ظهور أرقام تستطيع الاستقرار عند مستوى مُحدّد. ووضع نُصب عينه مراقبة الحدّ الحسّاس الفاصل بين الاستقرار والتذبذب. وشابهت أفعاله أن



تضاعف الدورات والكايوس. بدل استخدام رسوم منفصلة لإظهار سلوك المجموعات التي تمتلك قدرات خصوبة متفاوتة، استعمل روبرت ماي وفريقه «الرسم البياني المتفرّع» لتجميع المعطيات كلها في صورة مفردة.

يظهر الرسم أن التغيّر في مؤشر ما، مثل الخصوبة، يغيّر في سلوك هذا النظام البسيط. وتظهر قيم المؤشر مرسومة من اليمين إلى اليسار، فيما العدد النهائي للمجموعة مرتسم على المحور العمودي. وكلما زادت قيمة المؤشر، أصبح النظام أقرب إلى حال لاخطيّة. وعندما ينخفض المؤشر (إلى اليمين)، تقترب المجموعة من الفناء. وعندما يرتفع (في الوسط)، يرتفع المستوى الذي يتحقق عنده التوازن في عدد المجموعة. وبعدها، مع الاستمرار في ارتفاع المؤشر، يتفرّع حال التوازن إلى اثنين، تماماً مثلما تؤدي الزيادة في تسخين الماء إلى تفرّعه باضطراب بين حالي السائل والبُخار. ولذا، يشرع المجموع في التأرجح بين مستويين. ثم تزداد سرعة التفرّع. وبعد ذاك، يغدو النظام فوضوياً (إلى اليمين) ويتقلّب حال السكان، إلى ما لا نهاية له، بين أرقام متباينة.

يرصد مجموع السمك في بركة، مع قدرته على التحكم بتكاثرها صعوداً وهبوطاً. ورسم العلاقة بين ارتفاع قيمة المؤشر والعدد الكلي لمجموعة الأسماك. وتبيّن له أن الزيادة الوئيدة في المؤشر تترافق مع زيادة مضطردة في عدد المجموعة، وأن ذلك يرتسم في خط يتجه من الشمال إلى اليمين على الرسم البياني.

وفجأةً، عند بلوغ المؤشر قيمة مرتفعة جداً، انقسم الخط إلى اثنين. لقد رفضت الأسماك المفترضة أن تستقر عند عدد بعينه، لكنها تذبذبت بين نقطتين بالتناوب.

فانطلاقاً من عدد صغير يرتفع عدد المجموعة ثم يتأرجح، ثم يأخذ في التذبذب بصورة مستقرة. ومع المزيد من الزيادة، أي ما يشبه الاستمرار في تسخين الماء بعد غليانها، ينقسم التذبذب ثانية، فتنتج مجموعة من الأرقام التي تستقر على أربع قيم، بحيث تُعاود كل قيمة الظهور بعد أربع سنوات. ويتأرجح المجموع بين قيم تهبط وتصعد كل ٤ سنوات. لقد تضاعفت الدورة مرتين، في المرة الأولى إلى اثنتين ثم إلى أربع. وظل السلوك الدوري الناتج مُستقراً. وكما اكتشف لورنز قبل عقد، فإن الطريقة الوحيدة لاستخراج مغزى من تلك الأرقام، يكمن في تحويلها إلى رسوم بيانية. ولذا، عمد ماي إلى رسم مُخطط أولي، قصد منه تجميع المعلومات عن سلوك النظام عند المؤشرات المختلفة. وجعل خط مستوى المؤشر أفقياً، بقيم تتزايد من اليسار إلى اليمين. وتمثّل المجموع في الخطوط العمودية. وعند كل مؤشر، عيّن ماي نقطة تمثّل الناتج النهائي، بعد وصول النظام إلى حال التوازن. وفي اليسار، حيث القيم المنخفضة للمؤشر، فإن الناتج لا يزيد على نقطة ما يجعل المؤشرات المختلفة ترسم خطاً يرتفع قليلاً من اليسار إلى اليمين. وعندما تتجاوز قيم المؤشر نقطة حساسة مُعيّنة، يرسم ماي مجموعتين، فينقسم الخط إلى اثنين، كأنه نهر يتفرّع إلى جدولين، أو بالأصح يصبح التفرّع شبيهاً بالمذراة. ويتوافق الانقسام مع بلوغ المجموع مرحلة يعبر فيها من دورة إلى دورتين. ومع المزيد من الارتفاع في المؤشر، تتضاعف النقاط مرة وأُخرى وثالثة. بدا الأمر صاعقاً بسبب تعقيده، لكنه ظل محتفظاً بوتيرة منتظمة. وبحسب وصف ماي: «يشبه الأمر وجود أفعى

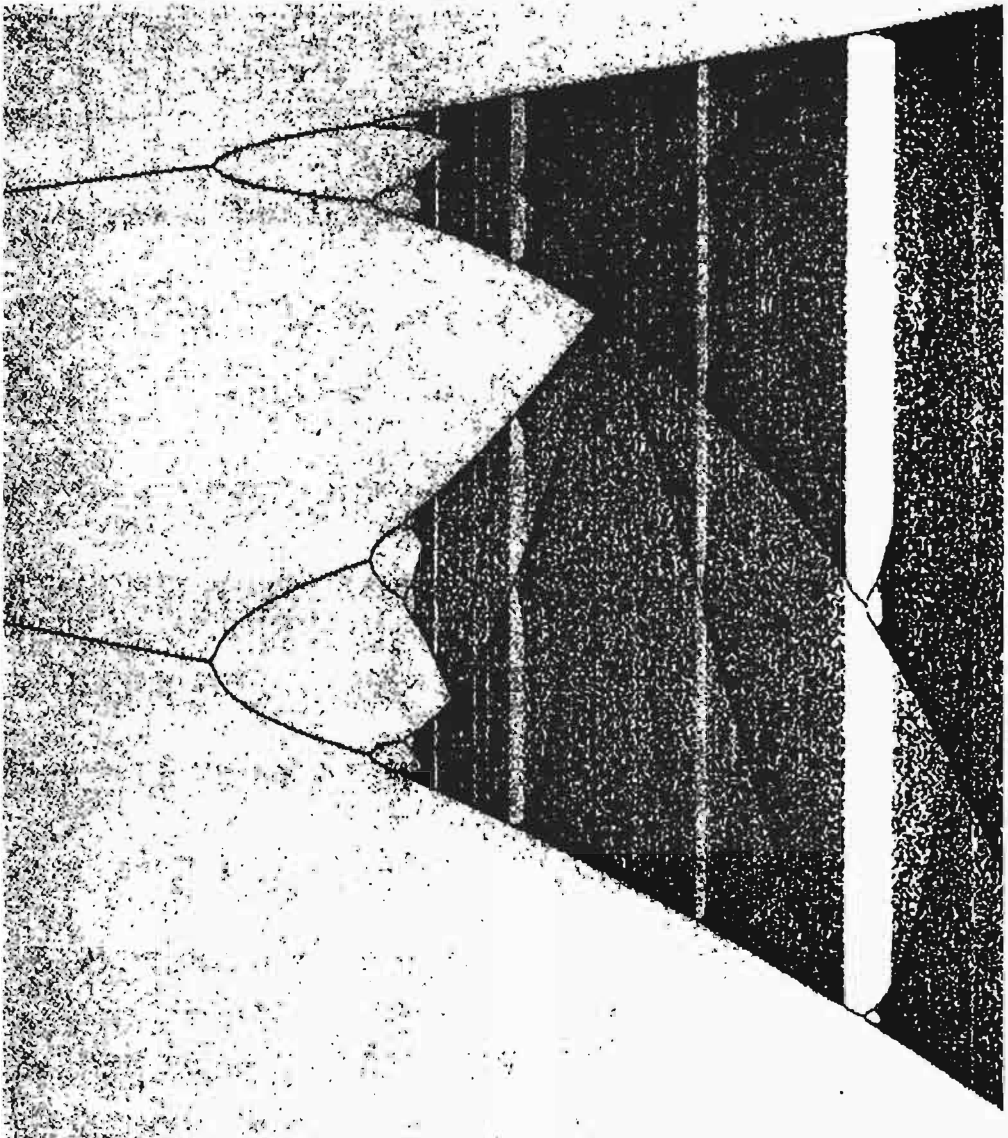
في عشب الرياضيات». ظهرت التضاعفات بحد ذاتها على شكل تفرّعات، وكل تفرّع يعني أن وتيرة التكرار تنقسم مُجدداً. إذا ابتدأنا من مجموعة سكانية ثابتة العدد، فإنها تصل إلى وضع تراوح فيه بين مستويات مختلفة سنوياً. وأما المجموعة التي تتذبذب بين رقمين كل سنتين، فانها ستتغيّر مرّة كل ٣ و٤ سنوات، مما يعني أنها انتقلت إلى الدورة الرابعة.

وتتزايد سرعة حدوث هذه التفرّعات، من ٤ إلى ٨ إلى ١٦ إلى ٣٢ وهكذا، ثم فجأة ينهار النظام. وبعد نقطة معينة، تسمّى «نقطة التراكم»، يحل الكايوس محل الوتيرة الدورية، فلا تستقر التذبذبات أبداً. وتصبح مناطق بأكملها من الرسم البياني سوداً. إذا كنت بصدد تتبع عدد مجموعة حيوانية يسير وفق أبسط المعادلات اللاخطيّة، فإنك قد تُفكّر أن التغيّرات السنوية هي عشوائية تماماً، كأنها تخضع لتشوش هائل. وعلى الرغم من ذلك التعقيد، تُعاود بعض الدورات الظهور فجأة. وعلى الرغم من الارتفاع المستمر في المؤشر، والذي يعني زيادة مستمرة في درجة اضطراب النظام، فإن دورة منتظمة قد تظهر فجأة، غالباً دورة برقم إفرادي مثل ٣ أو ٧. ويُكرّر نمط التغيّر في المجموع نفسه في دورات من ٣ أو ٧ سنوات.

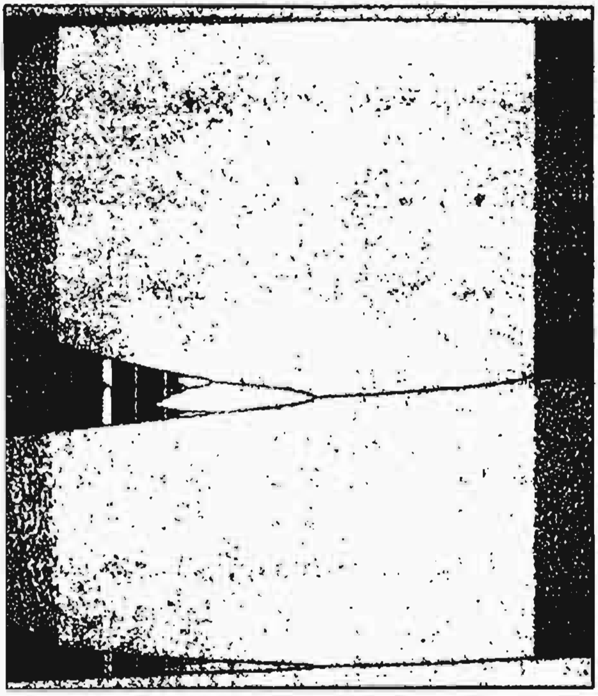
ثم تشرع التفرّعات التي تعني مضاعفة الدورة، في الظهور بسرعة متزايدة باطراد، بحيث تعبر الدورات بسرعة فتنتقل من ٣ ثم ٦ ثم ١٢ ؛ أو من ٧ إلى ١٤ إلى ٢٨، ثم ينهار النظام مرة أُخرى ليتجدّد الكايوس.

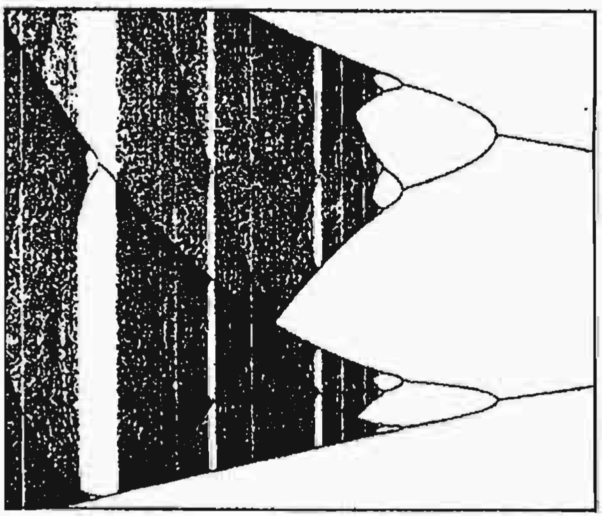
في البداية، لم يستطع ماي رؤية تلك الصورة كاملة ومع ذلك فإن الأجزاء التي توصّل إليها أظهرت أرقاماً مثيرة. فعند رصد نظام واقعي، يرى المُراقب جزءاً من الخط العمودي الذي ينجم عن مؤشر معين عند وقت محدد. وكثيراً ما يرى الراصد نوعاً منفرداً من السلوك، مثل الحال المستقرة أو دورة من ٧ سنوات، أو ربما عشوائية تامة.

ولكنه لن يستطيع أن يتعرف إلى عمل النظام الذي يستجيب لتغييرات بسيطة في بعض مؤشراته، عبر التحوّل إلى أنماط مختلفة كلياً. وقد حلّل جايمس يورك هذا السلوك،



فُرص الانتظام في قلب الفوضى: حتى في أشد المُعادلات بساطة، يظهر التفرّع تركيباً مُرهفاً وأشد انتظاماً مما اعتقده روبرت ماي. ففي البداية، يُعطي التفرّع دورات من ٢ و٤ و٨ و..١٦. ثم يشرع الكايوس في الظهور، عبر الدورات غير المنتظمة. ومع توغل الفوضى في النظام، تظهر دورات بأعداد افرادية. تظهر دورة من ٣ بصورة مستقرة (الصورة أعلاه)، ثم تتضاعف الدورة إلى ٦ و١٢ و..٢٤. إن هذا التركيب عميق. وعند تكبير الخطوط التي تُعبر عنه (انظر الصورة العليا في الصفحة المقابلة)، يتبيّن أنها تُشبه النظام في صورته الكبيرة (انظر الصورة السفلى في الصفحة المقابلة).





بصورة رياضية صارمة، في الورقة التي حملت عنوان: «الدورة الثالثة تعني الكايوس».

وعلى افتراض أنه إذا ظهرت دورة منتظمة خلال ٣ سنوات، في النُّظُم ذات البُعد الواحد، فالأرجح أن يُظهر النظام عينه دورات من أنواع عدّة، وكذلك دورات عشوائية تماماً. وقع ذلك الأمر كصاعقة كهرباء على الفيزيائيين، لأنه مثَّل مُعاكسة تامة لحدسهم. لقد عرفوا أن من السذاجة الاعتقاد في إمكان صنع نظام يتذبذب بدورات ثلاثية من دون ظهور نوع من الفوضى. وبرهن لهم يورك أن عدم ظهور تلك الفوضى مستحيل. وعلى الرغم من الصدمة التي أحدثتها، أدرك يورك أن ورقته تستطيع هزّ العلاقات بين علماء الفيزياء، بقوة تفوق صلابة براهينها. وثبت أنه مُحقّ جزئياً.

فبعد سنوات قليلة، استفاد من فرصة حضوره مؤتمراً دولياً في برلين الشرقية، ليركب زورقاً في نزهة عبر نهر «سبري». وفجأة اقترب منه مواطن روسي مُحاولاً التفاهم معه. وبمساعدة صديق بولوني، فهم يورك أن الروسي يزعم أنه توصّل إلى النتيجة عينها. ورفض الروسي إعطاء تفاصيل، لكنه وعد أن يُرسل ورقة عن بحثه.

وبعد أربعة أشهر، وصلت الورقة إلى يورك. وتبيّن أن آي. أن. ساركوفسكي سبق يورك، من خلال بحث حمل اسم «التعايش بين دورات خريطة مستمرة عن الخط نفسه». ولكن إنجاز يورك تجاوز براهين الرياضيات. لقد بعث برسالة إلى علماء الفيزياء تقول إن الفوضى كُليّة القُدرة، ومستقرّة ومُنظّمة. كما برّر الاعتقاد بأن من المستطاع درس النُّظُم المُعقّدة، التي عُبّر عنها تقليدياً بمُعادلات تفاضلية صعبة، بواسطة خرائط سهلة.

عبّر مشهد اللقاء بين يورك والروسي عن ثغرة في التواصل بين العِلمين السوفياتي والغربي. لعبت اللغة دوراً في تلك الثغرة، وعاد جزء كبير منها إلى تقييد حرية سفر العلماء السوفيات، مما أدى إلى وضع كرّر فيه علماء الغرب مراراً بحوثاً أنجزها نظراؤهم السوفيات. وكذلك ولّدت الكثير من البلبلة الناجمة عن الإحساس بأن العلم الجديد لم يكن غريباً عن موسكو. لقد أرسى علماء الرياضيات والفيزياء السوفيات تقليداً في دراسة الكايوس، يرجع إلى أيام آي. أن. كولموغوروف في خمسينات القرن العشرين. وإضافة

إلى ذلك، فقد ألفوا العمل بتآزر، وهذا ما أنقذهم من فترة الانفصال بين الفيزياء والرياضيات التي سادت غرباً.

وتلقى العلماء السوفيات بحوث سمييل بترحاب. وأثارت «حدوة الحصان» التي اكتشفها نقاشاً شاملاً في الستينات من القرن العشرين. واستطاع عالم رياضيات لامع، اسمه ياشا سيناي، أن ينقل مفاهيم سمييل إلى علم الديناميكا الحرارية. وعلى نحو مُشابه، انتشرت بحوث لورنز في الاتحاد السوفياتي بسرعة، عند ظهورها في مطلع سبعينات القرن عينه. وفي العام ١٩٧٥، وفيما جاهد يورك وماي ليلفتا انتباه زملائهم من العلماء، استطاع سيناي وغيره تنظيم مجموعة بحث من علماء الفيزياء، تجمّعت في مدينة «غوركي». وفي الثمانينات، درج علماء الغرب على زيارة الاتحاد السوفياتي بانتظام للاطلاع على تلك الأعمال.

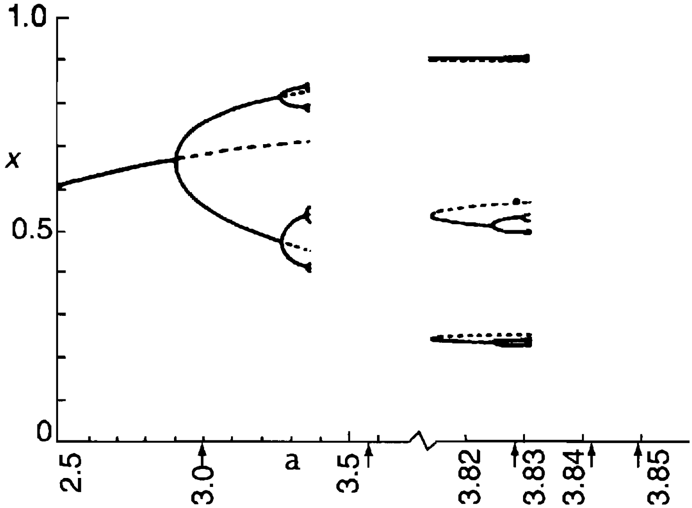
وبقيت غالبيتهم ميّالة للأخذ بالطريقة الغربية في مقاربة الكايوس.

وفي الغرب، التقط يورك وماي مُبكراً أهمية مفهوم تضاعف الدورات والصدمة التي يحملها علمياً. واستطاعا إمرار تلك الصدمة للمجتمع العلمي. لقد استطاعت قلّة من علماء الرياضيات ملاحظة تلك الظاهرة، فتعاملت معها باعتبارها نشازاً عددياً، كأنها نوع من التلاعب. لم يتفهموا شأنها؛ لكنهم اعتبروها من الأشياء الخاصة بعالمهم.

وتجاهل علماء البيولوجيا التفرّع عندما رصدوا بعض مظاهر الكايوس، لأنهم لا يحوزون مهارات رياضية كافية للتعامل معه، ولأنهم لم يميلوا لتقصي السلوك غير المنتظم. ولاحظ علماء الرياضيات التفرّع، لكنهم تجاهلوه. ولكن عندما ظهر التفرّع لعينيّ ماي، الذي يضع قدماً في الحقلين كليهما، أدرك أنه بصدد حقل مُدهش وشاسع.

للتعمق في أشد النُظُم بساطة، احتاج العلماء إلى حواسيب أكثر قوة. امتلك فرانك هوبنشتاد، من «معهد كورانت لعلوم الرياضيات» في جامعة نيويورك، كومبيوتراً فائق القوة، فقرر استخدامه في صنع فيلم.

تخصص هوبنشتاد في الرياضيات، ثم مال لعلم البيولوجيا. وأدخل معلومات عن



الشكل العام للرسم البياني عن التفرّع، كما رأه ماي في المرة الأولى،
وقبل أن تُظهر الكومبيوترات القوية ذات الغنى الهائل الذي تكتنزه.

المَعادلة الخطيّة اللوجستية مئات الملايين من المرات في كومبيوتره «كونترول داتا ٦٠٠٠». والتقط الكومبيوتر لشاشته صوراً عن آلاف القيم المتغيّرة للمؤشر. وفي تلك الصور، ظهر التفرّع والكايوس. ثم ظهر، ضمن الكايوس، بعض الشذرات من الانتظام تميّزت باستقرارها الهائل، ومثّلت نتفاً من سلوك منتظم ودوري. ومُذ شاهد تلك الصور، أحس هوبنشتاد أنه يطير فوق أرض عجائبية. في لحظة ما، تبدو الصور غير فوضوية على الإطلاق، وفي اللحظة التي تليها تعود للكايوس التام. سيطر شعور بالدهشة على هوبنشتاد. شاهد كثيرون فيلمه أيضاً. وشرع في جمع صور مماثلة من حقول معرفية مختلفة مثل الجينات والاقتصاد والسوائل. وصار مثل بائع متجوّل، بضاعته الكايوس. وتميّز عن اختصاصيي الرياضيات البحت بشيئين. أولاً، لم تشكّل المعادلات البسيطة، بالنسبة إليه، الحقيقة فعلياً. وعلم أنها مجرد تشبيه على الحقيقة.

ويتمثّل الثاني في تلك الإضاءات عن الكايوس انتقلت مباشرة إلى إحدى أقوى المسائل الخلافية في حقل تخصصه. فلمدة طويلة، جذب علم بيولوجيا السكان

الخلافات من كل نوع. وللمثال، ساد توتر دائم في أقسام البيولوجيا بين علماء الأيكولوجيا وعلماء الهندسة الوراثية. فقد ظن الأخيرون أن حقلهم يشكّل علم البيولوجيا فعلياً، فيما بدت لهم أعمال الأيكولوجيين غائمة وغير مُحدّدة. وفي المقابل، اعتقد الأيكولوجيون أن التقدم التقني في علم الهندسة الوراثية ليس سوى تطور للمسائل التي تبلورها بحوثهم!

وفي سبعينات القرن العشرين، لاحظ ماي أيضاً، وجود خلاف مركزي في علم الأيكولوجيا نفسه يتركز على طبيعة التغيير في أعداد المجموعات الحيّة. وانقسم علماء الأيكولوجيا بشأن تلك النقطة بحسب شخصياتهم. انطلق بعضهم من اقتناعه الراسخ بأن العالم منتظم، ما يوجب أن تكون المجموعات الحيّة فيه منتظمة أيضاً، مع وجود استثناءات. وذهب آخرون إلى الاتجاه المُعاكس كلياً. إذ اعتقدوا أن أعداد المجموعات الحيّة تتقلّب بصورة عشوائية، مع وجود استثناءات. ولم تكن مصادفة انقسام الأيكولوجيين إلى معسكرين متقابلين رافقه انقسام مماثل بشأن تطبيق قواعد الرياضيات الصارمة على المسائل البيولوجية الحسّاسة. وذهب أنصار الانتظام إلى تبنّي الرياضيات الصارمة وآلياتها الحتمية. في حين رفض الآخرون التسليم بوجود آليات حتمية في مسائل البيئة المتقلبة.

ولم يعد من خيار لحل وسط. إما القول بالحتمية الرياضية التي ينجم عنها سلوك مستقر، وإما التمسك بالتشوّش الذي يُعطي سلوكاً عشوائياً.

وفي خضم النقاش، حملت نظرية الفوضى مفهوماً مُدهشاً: في إمكان المُعادلات البسيطة أن تُعطي ما يُشبه السلوك العشوائي. إن تلك العشوائية تملك تنظيماً مُرهفاً، لكن أقسامه شديدة التشوّش أيضاً!

لقد لمست نظرية الفوضى عصباً حساساً في قلب الخلاف الأيكولوجي.

شرع ماي في تفحص المزيد من النُظُم البيولوجية على ضوء النموذج البسيط عن الكايوس. وتوصل دوماً إلى ما هزّ المسلمات الأساسية عند الدارسين. ففي علم الأوبئة

مثلاً، من المعروف أن موجات الوباء تنحو للتكرار بصورة دورية، سواء أكانت منتظمة أم لا. تأتي الحصبة وشلل الأطفال والحصبة الألمانية في إيقاع يرتفع وينخفض. وأدرك ماي أن تلك التذبذبات يمكن تقليدها عبر النموذج اللاخطي، فتساءل عمّا يحلّ بذلك النموذج إذا تلقّى دفعة غير متوقعة، بمعنى حدوث اضطراب من نوع إدخال برنامج للتلقيح على منطقة اعتاد الوباء ضربها تكراراً. يذهب الحدس البسيط للاعتقاد بأن النظام سيتغيّر بسلاسة في الاتجاه المرغوب فيه. وأما فعلياً، فقد وجد ماي أن تقلبات ضخمة تأخذ في الظهور. حتى في حال ميل الوباء للانخفاض على المدى الطويل، فإن مساره يكون مُتعرّجاً بحيث يصل إلى نقاط من التوازن عبر سلسلة من الارتفاعات المُفاجئة.

وأيّدت المعلومات المتأتية من البرامج الفعلية، مثل حملة القضاء على الحصبة الالمانية في بريطانيا، نموذج التذبذب الذي توقعه ماي.

وفي المقابل، رأى مسؤولو الصحة، عند رؤيتهم للارتفاع القصير المدى في إصابات الحصبة الألمانية، أن برنامج التلقيح قد فشل! وخلال سنوات قصيرة، ضخّت نظرية الفوضى الكثير من المفاهيم في نظريات البيولوجيا. كما صنعت شراكة لم تكن مُتخيّلة سابقاً، بين البيولوجيين والفيزيائيين. وشرع علماء الأوبئة والأيكولوجيا في التعاون لنبش المعلومات التي أهملها العلماء سابقاً لاعتبارها غير مُجدية. وعُثر على مقولات عن الفوضى الحتمية في السجلات الصحية لمدينة نيويورك خلال موجات الحصبة، وفي سجلات مراقبة أعداد حيوان الوشق، الذي يُشبه النمر، في منطقة نهر الهدسون. وشرع علماء الهندسة الوراثية في التفكير بالبروتينات باعتبارها نُظُماً من الحركة. واعتبر اختصاصيّو الفيزيولوجيا (علم وظائف الأعضاء) أن أعضاء الجسم ليست تركيبات مستقرة، بل تعيش أحوالاً من التذبذب، بحيث تتقلب بين الاستقرار وعدم الانتظام.

وأخذ الاختصاصيّون من علوم متباينة، بحسب ما علم به ماي، بالنقاش عن السلوك المُعقد في النُّظُم.

وشرع كل حقل معرفي في إنتاج نمطه الخاص من الكايوس. ولكن، ما الذي تعنيه أن

تأتي العشوائية من نماذج بسيطة؟ وماذا ينجم عن تطبيق النماذج البسيطة عينها لدرس التعقيد في حقول علمية مختلفة؟ أدرك ماي أن التراكيب المُدهشة التي شرع في تقصيها لا تملك صلة أصيلة مع البيولوجيا. وسأل عن رأي العلماء الآخرين في ما توصّل إليه. وانصرف للعمل واعتقد لاحقاً أنه بحث يحمل مهمة تبشيرية عن الخلاص، فكان المقال الذي ظهر في مجلة «نايتشر» العلمية في العام ١٩٧٦.

يتطوّر العلم بصورة فضلى، بحسب تعبير ماي، لو أُعطي كل عالم آلة حاسبة قوية وتعلم العمل على «مُعادلة الفارق اللوجستي».

إن ذلك الحساب البسيط، الذي عرض تفاصيله في مقال مجلة «نايتشر» المذكور آنفاً، في إمكانه أن يزيل الصورة المُشوهة التي يفرضها التعليم التقليدي عن العالم، والذي يكتظ باحتمالات هائلة التنوّع.

وإن ذلك الأمر يتكفّل أيضاً بتغيير الطريقة التي ينظر بها الناس إلى الأشياء، بداية من التقلّبات الدورية في الأعمال ووصولاً إلى انتشار الاشاعات الكاذبة.

يجب تدريس الكايوس. تلك كانت رسالة ماي، الذي ظن أن الوقت قد حان لإزالة الانطباع الخاطئ الذي يولّده التعليم التقليدي. فبغض النظر عن درجة التطوّر التي تستطيع المُعادلات الخطيّة بلوغها، فإنها تُضلّل العلماء باستمرار لأنهم يتعاملون مع كون مملوء باللاخطيّة.

وكتب ماي «أن الحدس الرياضي، مهما تطوّر، لا يؤهل الدارس لمواجهة السلوك الغرائبي الذي يُظهره أبسط النُّظُم اللاخطيّة... ليس فقط خلال البحوث، وإنما أيضاً في الحياة اليومية للسياسة والاقتصاد، تتحسن النظرة العامة للعالم عند إدراك أن النُّظُم البسيطة اللاخطيّة لا تملك بالضرورة صفات ديناميكية خطيّة».

هندسة الطبيعة

«ومع ذلك تظهر العلاقة علاقة صغيرة،

تتمدَّد كظلّ لغمامة على الأرض، لشكل ما على سفح تلة»

واليس ستيفنز

«العارف بأمور الكايوس»

شرعت صورة عن الطبيعة في التبلور عبر السنين، في دماغ بنواه ماندلبروت. وفي العام ١٩٦٠، ظهرت كشبح لفكرة، كصورة باهتة. ولكنها ضربت في عقل ماندلبروت، منذ أن شاهدها للمرة الأولى على اللوح الأسود في مكتب هندريك هوثاكر. تخصّص ماندلبروت في الرياضيات، فعشق جميع أنواعها.

واحتضنه قسم البحوث في «مؤسسة آلات الأعمال الدولية»، التي تشتهر باسمها المُختصر «أي بي أم» (IBM)، وهي من كبريات مؤسسات الكومبيوتر والمعلوماتية عالمياً. وتعامل مع المسائل الاقتصادية، فدرس ظاهرة توزيع المداخيل المتفاوتة وأثرها على الاقتصاد. فيما شغل هوثاكر منصب أستاذ الاقتصاد في جامعة هارفرد. ووجه دعوة لماندلبروت ليلقي محاضرة. وعندما وصل الرياضي الشاب إلى «مركز ليتاوير»، ذهل لرؤية بحوثه غير المنشورة مرسومة بصورة بيانية على اللوح الأسود في مكتب الأستاذ المخضرم! ومازح ماندلبروت مُضيفه بسؤاله عن الطريقة التي «بُثّت» فيها بحوثه مُجسّمة على اللوح. وفوجئ بأن مُضيفه لا يملك أدنى فكرة عما يتحدث عنه! فما رُسم على اللوح لم يكن بحوثاً، بل رسماً بيانياً عن التقلّب في أسعار القطن خلال ثماني سنوات!

وبالنسبة لهوثاكر، بدا الرسم غرائبياً أيضاً. فقد افترض الاقتصاديون دوماً أن سعر سلعة مثل القطن، تتراقص على إيقاعين أحدهما منتظم والآخر عشوائي.

وعلى المدى الطويل، تبدو الأرباح خاضعة لتأثير ثابت من القوى الحقيقية في الاقتصاد، مثل صعود أسعار مصانع النسيج في ولاية نيوجيرسي وهبوطها؛ والتوسّع في إنشاء الطرقات السريعة. أما في المدى القصير، فإن الأسعار تتقلب عشوائياً.

ولسوء الحظ، خذلت معطيات هوثاكر تلك التوقعات، التي درج على تبنيها بنفسه

أيضاً. فقد تضمّنت الكثير من القفزات الكبرى. كثيراً ما تتقلّب الأسعار ضمن حدود ضيّقة، لكن نسبة التقلبات الكبيرة إلى الصغيرة بدت مرتفعة إلى حدّ يفوق توقعاته. ولم يتأرجح التوزيع بين صعود وهبوط، بل مال لاتخاذ شكل ذيل طويل.

في النموذج التقليدي، يتخذ الخط البياني للتقلّب شكل الجرس. في منتصفه، حيث يتقوّس الجرس إلى الأعلى، تتجمع معظم المعلومات حول المعدل المتوسط. وفي الأطراف، هناك القيم المتطرفة صعوداً وهبوطاً، والتي تزول بسرعة.

ويستخدم اختصاصيو الإحصاء منحنى الجرس بطريقة تُشبه استعمال الطبيب المتمرن للسمّاعة، إنها أول أداة يلجأ إليها. وكذلك فإنها تمثّل المعيار الذي يُشار إليه باسم «التوزّع الطبيعي» للأشياء، الذي يحمل اسم «التوزّع الغوسياني». ويفيد منحنى الجرس في إعطاء فكرة عن طبيعة العشوائية. ويشير إلى أن الأشياء تتغيَّر، لكنها تنحو للبقاء قرب نقطة المعدل المتوسط (المعيار) في معظم الأحيان، ثم تتوزّع بقية الأشياء على الأطراف، وبطريقة منتظمة. وكطريقة لتلمس المسارات الصعبة في الاقتصاد، يعطي مفهوم المعيار حساً مرغوباً فيه بالاستقرار. وبحسب تعبير وايزلي ليونتيف، الحائز جائزة نوبل: «لا يشبه الطابع التجريبي للاقتصاد أي حقل معرفي آخر، بسبب قدرته على استهلاك الكثير من الجهود الإحصائية من دون مردود مميز».

THE
NORMAL
LAW OF ERROR
STANDS OUT IN THE
EXPERIENCE OF MANKIND
AS ONE OF THE BROADEST
GENERALIZATIONS OF NATURAL
PHILOSOPHY ◆ IT SERVES AS THE
GUIDING INSTRUMENT IN RESEARCHES
IN THE PHYSICAL AND SOCIAL SCIENCES AND
IN MEDICINE AGRICULTURE AND ENGINEERING ◆
IT IS AN INDISPENSABLE TOOL FOR THE ANALYSIS AND THE
INTERPRETATION OF THE BASIC DATA OBTAINED BY OBSERVATION AND EXPERIMENT

THE BELL-SHAPED CURVE.

منحنى الجرس

وبغض النظر عن الطريقة التي استعملها هوثاكر في التوصل لذلك الرسم البياني الذي رآه ماندلبروت على اللوح الأسود، فإن توزيع أسعار القطن لم يتخذ شكل منحنى الجرس.

ولقد صُدم ماندلبروت بشكل ذلك الرسم، لأنه رأى ما يُشبهه في الكثير من المجالات العلمية المتباعدة. وعلى عكس الكثير من علماء الرياضيات، اعتاد ماندلبروت مواجهة المسائل الشائكة في الرياضيات بالاعتماد على حدسه بالنسبة للأنماط والأشكال. لم يثق بالتحاليل، لكنه وثق بالصور الذهنية. وقد امتلك فكرة تفيد بأن قوانين أُخرى؛ بسلوك مغاير، قد تتحكم بالظاهرة العشوائية.

ولدى عودته إلى شركة «أي بي أم»، في «يوركتاون هايتس» في نيويورك، في تلال شمال «وستشستر كاونتري»، حمل ماندلبروت معه صندوقاً من بطاقات تحتوي على أسعار القطن التي درسها هوثاكر. وأرسل إلى وزارة الزراعة طالباً المزيد منها، ورجوعاً إلى العام ١٩٠٠.

وحينذاك، مثل كثير من العلماء في علوم أُخرى، انشغل اختصاصيو الاقتصاد بالعبور إلى عالم الكومبيوتر، مُدركين ببطء أنه بات في استطاعتهم التعامل مع المعلومات على مستوى لم يكن مُتخيّلاً في السابق.

لم تكن المعلومات كلها متوافرة، كما تحتّم التعامل مع الكثير من المعلومات الخام أيضاً. وبدت فترة الانتقال في بدايتها أيضاً، متميزة برواج البطاقات الإلكترونية المثقبة. وفي قلب العمل العلمي، وجد الباحثون أن من الأسهل تجميع آلاف أو ملايين المعلومات على هيئة نقاط في تلك البطاقات. لقد تعامل الاقتصاديون، مثل البيولوجيين، مع عالم مملوء بالكائنات الحيّة. وتعيّن على الاقتصاديين أن يدرسوا أكثرها مخادعة، أي الإنسان.

وفي المقابل، أمدّت حركة الاقتصاد الاختصاصيين بالمعلومات المتدفقة. وبالنسبة لماندلبروت، شكّلت أسعار القطن مصدراً مناسباً للمعلومات. ووصلته سجلات تحتوي على معلومات كاملة تمتد على مدار قرن.

تشكّل أسعار القطن عالماً من التفاعل بين البيع والشراء، مع وجود سوق مركزية، وبالتالي سجلات مركزية، لأن قطن الجنوب كله صبّ في سوق نيويورك، على مدار قرن، في طريقه إلى «نيوانغلاند»؛ كما ارتبطت أسعاره في ليفربول مع سوق نيويورك.

وفي الغالب، لا يملك الاقتصاديون الكثير عندما يتعلق الأمر بأسعار السلع والأسهم. ولا يعني ذلك أنهم يفتقدون نظرة أساسية عن تقلّبات الأسعار. وعلى العكس، فقد تشاركوا في مجموعة من المسلمات، مثل القول إن التغييرات العابرة الصغيرة لا تؤثر في الصورة الكبيرة لتقلبات الأسعار، وإن التقلّبات السريعة تأتي عشوائياً، وإن التقلّبات اليومية على المستوى الصغير هي محض تشويش، غير قابل للتوقع وغير مثير للاهتمام. وعلى عكسها، فإن التقلبات الكبرى في الأسعار، عبر الشهور والسنوات والعقود، تأتي من عمق قوى الاقتصاد على المقياس الكبير، من وزن الحروب أو الركود، أي تلك القوى التي يمكن فهمها بطرق مختلفة. في ناحية، هناك التشوش؛ وفي الناحية الأخرى، هناك إشارات التغيّر الطويل المدى.

وكما تبيّن لاحقاً، أن هذا الانفصال الثنائي لا مكان له في الصورة الحقيقية التي شرع ماندلبروت في صوغها.

وعوضاً عن فصل التغيّرات الصغيرة عن الكبيرة، ربطت صورته الاثنين معاً. لقد بحث عن الأنماط في كل المستويات. ولم يكن سهلاً التوصّل إلى طريقة لرسم الصورة التي شرعت تتكوّن في رأسه، لكنه راهن على وجود نوع من التناظر بين المقياسين الكبير والصغير.

وشرع ماندلبروت في ضخ المعلومات عن أسعار القطن عبر كومبيوترات شركة «أي بي أم»، فعثر على النتائج التي سعى إليها. لقد أدّت الأرقام التي نُظِر إليها باعتبارها تشوشاً، من وجهة نظر التوزيع الطبيعي، إلى إحداث التناظر بين المقياسين. إن كل تقلّب في السعر عشوائي وغير متوقع، لكن نسق التقلّبات لم يتفاوت بين المقياسين الكبير والصغير. وتطابق المنحنيات التي تدل على التغيّرات اليومية في الأسعار مع تلك التي ترسم التغيّرات شهرياً.

وعلى نحو لا يُصدق، أظهر تحليل ماندلبروت أن درجة التغيّر بقيت ثابتة عبر تقلبات استمرت ستين سنة شهدت الركود الاقتصادي الكبير والحرب العالمية الثانية! لقد ضمّت تلك المعلومات الفائقة التشوش، نوعاً غير متوقع من الانتظام. وبالتأمل في درجة عشوائية الأرقام التي يتعامل معها ماندلبروت، اندلع في ذهنه سؤال عن ضرورة وجود أي قانون أصلاً. ولماذا قد ينطبق ذلك القانون، بصورة متساوية، على المداخيل الشخصية وأسعار القطن؟

الواقع أن ماندلبروت لم يحز الكثير من العلاقات مع اختصاصيي الاقتصاد، الذي يملك خبرة ضئيلة به. ولذا، نشر مقالاً عما اكتشفه مسبوقاً بمقال لأحد طلبته يشرح فيه ذلك الاكتشاف بمصطلحات أهل الاقتصاد. وبعدها، انتقل ماندلبروت إلى مجالات أُخرى، ليختبر ما اكتشفه عن المقياس، الذي بدا وكأنه ينبض بالحياة، أو كأنه هوية وتوقيع.

وبعد سنوات طويلة، استهل بفخر محاضرة له بالقول: «لقد عملت في الاقتصاد في هارفرد، وفي الهندسة في «يال»، وفي الفيزيولوجيا في «كلية آينشتاين للطب»... يحدث أن أسأل نفسي، عندما أُصغي إلى القائمة الطويلة من الوظائف التي مارستها، إذا كنت موجوداً فعلياً، لأن التقاطع بين تلك المجموعات لا بد أن يكون صفراً»! وبعد أيامه في شركة «أي بي أم»، بات من الصعب على ماندلبروت التنقّل بين وظائف مختلفة. لقد اقترب من علوم مختلفة، وبطريقة الغريب دائماً.

لذا، توصّل إلى مقاربة غير تقليدية في الرياضيات، واستكشف علوماً لم تُرحب به، وخبّأ أفكاره الكبرى خلف محاولاته المستمرة لنشر بحوثه، وتمكّن من العيش بفضل ثقة رؤسائه في شركة «أي بي أم». لقد نفّذ طلعات في علوم مثل الاقتصاد، ثم انسحب مُسرعاً، مُخلّفاً أفكاراً مثيرة لكنها غير مدعومة بكمية مُناسبة من البحوث.

وشق طريقاً خاصة به في تاريخ الكايوس. ومع ذلك، فإن صورة عن العالم الفعلي ظلّت تختمر في رأسه. وتدريجاً، تطوّر ذلك الشكل المُبهم الذي رآه في العام ١٩٦٠، إلى

حقل جديد في علم الهندسة. وبالنسبة إلى الفيزيائيين الذين يعملون استناداً إلى مكتشفات علماء مثل لورنز وسمييل ويورك وماي، بدا ماندلبروت أقل وزناً، لكن تقنياته ومصطلحاته حفرت في نصوص علم الكايوس. يبدو هذا الوصف غير ملائم بالنسبة لمن عرفوه في سنواته الأخيرة، مُحاطاً بهالته الشخصية وبقائمة طويلة من الألقاب. ولكن ربما كانت أفضل طريقة لفهم بنواه ماندلبروت هي تصوره كلاجئ. فقد وُلد في وارسو في العام ١٩٢٤ في عائلة يهودية من ليتوانيا. عمل أبوه في تجارة الملابس بالجملة، وأمه طبيبة أسنان. وتنبّهت العائلة للمتغيّرات السياسية، فانتقلت إلى باريس في العام ١٩٣٦، بدعم من سزوليم ماندلبروت، عمّ بنواه، والذي كان اختصاصياً في الرياضيات. ومع اندلاع الحرب، نجت العائلة مُجدّداً من النازية بأن تركت كل ما تملكه، عدا حقائب قليلة، لتسير مع قوافل النازحين التي سدّت الدروب جنوب باريس. ووصلت العائلة إلى «تول». عمل بنواه كصبي حداد، ما لم يتلاءم كثيراً مع طوله الفارع ومستواه الدراسي. وعندما تحدث ماندلبروت عن تلك الحقبة في ما بعد، فإن أكثر ما تذكّره هو الإعجاب الذي لاقاه من مُدرسيه في «تول» وغيرها. وعموماً، لم يكن تعليمه منتظماً ولا مستمراً. بل زعم مراراً أنه لم يتعلم الألفباء؛ ولم يُلقّن أصول الحساب. لكنه امتلك موهبة. فلدى تحرير باريس من النازيين، في نهاية الحرب العالمية الثانية، نجح في اجتياز امتحاني الدخول لل«ايكول نورمال» (Ecole Normale) و«ايكول بوليتكنيك» (Ecole Polytehnique)، على رغم أنه لم يكن مؤهلاً لتلك الامتحانات المرعبة في صعوبتها. وتضمنت امتحانات الدخول، التي تستمر شهراً، مسابقة في الرسم، تكشفت فيها موهبة ماندلبروت إذ نجح في نسخ لوحة «فينوس» للرسّام الفرنسي ميلو.

واستطاع اجتياز مسابقات الرياضيات، التي اشتملت على الجبر والتحليل المتكامل، بفضل تفوقه في الهندسة. وأدرك أنه يستطيع حلّ مسائل الجبر من خلال تحويل المعادلات إلى رسوم في ذهنه. وما إن يتوصل إلى شكل ما، حتى يأخذ في التلاعب به، وتحويره، وتحريك توازناته لجعله أكثر اتساقاً. وكثيراً ما أوصله ذلك إلى حلّ للمسائل التي يتصدّى

لها. وحصل على درجات متدنية في الكيمياء والفيزياء، إذ لم تفده موهبته في الهندسة. تعتبر الـ«ايكول نورمال» والـ«ايكول بوليتكنيك» من مدارس النخبة التي لا يوجد ما يوازيها في النظام التعليمي في أميركا. ولا يزيد عدد خريجيهما على ٣٠٠ متخرّج سنوياً في كل فرع من المعارف. وابتدأ ماندلبروت مع الـ«ايكول نورمال»، التي تعتبر الأكثر نخبوية، لكنه غادرها بعد بضعة أيام إلى «البوليتكنيك». لقد كان لاجئاً من بورباكي.

الأرجح أن بورباكي تُمثّل حالاً يصعب إيجادها خارج فرنسا المولعة بالأكاديميات المرجعية والتعليم الصارم. فقد ابتدأت كناد، أسّسه عقب الحرب العالمية الأولى سزلوم ماندلبروت، مع حفنة من علماء الرياضيات الشبان من أجل إعادة بناء الرياضيات الفرنسية. تسبّبت الحرب العالمية الأولى بإحداث فجوة بين أجيال من أساتذة الجامعات وطلبتها، مما أخلّ بتقاليد الاستمرارية أكاديمياً. وحاولت تلك النخبة الشابة أن ترسي أُسساً جديدة لممارسة الرياضيات. وشكّل اسم مجموعتهم نكتة بحد ذاته، إذ استعاروه من اسم جنرال فرنسي ذي أُصول يونانية، بسبب رنينه الغريب الوقع على الأُذن. لقد وُلدت بورباكي باللعب، وتلاشت بسرعة.

وعمد أعضاء النادي للقاء سرّاً. ولا تُعرف أسماؤهم كلّها. وأبقوا عددهم ثابتاً. وعندما يصل عضو إلى سن الخمسين، ينبغي أن يُخلي مكانه لقادم جديد، يُختار انتخاباً. كانوا كوكبة من ألمع علماء الرياضيات. وامتد نفوذهم عبر القارة الأوروبية.

وبشكل جزئي، انطلقت بورباكي كرد فعل على انطوان بوانكاريه، الفيزيائي وعالم الرياضيات الفرنسي الكبير من القرن التاسع عشر، الذي كان مُفكراً وكاتباً. واشتهر بعدم ميله للتشدّد علمياً. ورأت مجموعة بورباكي أن بوانكاريه خلّف الرياضيات الفرنسية في حال من الاهتزاز.

وشرعت المجموعة في كتابة مقالات علمية ضخمة، مستخدمة أسلوباً فيه هوس بالعلم، من أجل تصحيح ذلك المجال. ووضعت نصب عيونها إعادة الاعتبار للتحليل المنطقي في الرياضيات. فبحسب رأيهم، يجب على عالم الرياضيات الانطلاق من

مبادئ أولى صلبة، ثم يستخرج بقية القواعد منها. وشددت المجموعة على أولوية الرياضيات بالنسبة للعلوم، وكذلك على انفصالها عنها. وبالنسبة لهم، فإن الرياضيات هي الرياضيات. وليس صحيحاً تقويم الرياضيات بمعيار القدرة على تطبيقها على الواقع الفيزيائي. إضافة إلى ذلك، رفضت مجموعة بورباكي استعمال الصور، لأنها قد تخدع ذهن المتخصص في الرياضيات. ولم تثق بالهندسة. واعتبرت الرياضيات نشاطاً نقياً وشكلياً ونخبوياً.

ولم تُمثّل مجموعة بورباكي تطوراً اقتصر شأنه على فرنسا. ففي الولايات المتحدة أيضاً، حاول علماء الرياضيات التملّص من تطلّب العلوم الفيزيائية لمساهماتهم، بقدر ابتعاد الفنانين والكتّاب عن ذائقة العوام. وسيطر حسّ بضرورة العزلة. وشرع علماء الرياضيات بالاهتمام بمسائل نظرية بحتة، وباتت مناهجهم أمثولات شكلية. وافتخر بعضهم بالقول أن عمله لا يشرح شيئاً في العالم أو العلم. لقد أعطى هذا الميل الكثير من الثمار الصالحة، كما أغنى الرياضيات علمياً. اعتقد ستيفن سمييل، حتى أثناء عمله على إعادة اللحمة بين الرياضيات والعلوم الطبيعية، أن الرياضيات يجب أن تكون شيئاً قائماً في ذاته.

وصار الانهمام بالذات في الرياضيات شديد الوضوح، وترافق مع التشدد في الأمثولات ذات الأساليب الصارمة. وفهم كل عالم رياضيات مُجِد أن الصرامة هي معيار قوة هذا الحقل علمياً، إذ اعتبرت الهيكل الحديد الذي يرتكز عليه البناء. إن الصرامة هي ما يتيح لعلماء الرياضيات اختيار ضرب من الأفكار تمتد عبر الزمن، وتبقى ثابتة كالغرانيت.

ومع ذلك، أدى تطلّب الصرامة إلى نتائج غير مقصودة، بالنسبة للرياضيات في القرن العشرين. فقد صارت حقلاً ينمو بطريقة خاصة. يختار باحث ما مسألة ويبدأ بالعمل عليها باختيار الطريقة التي يريد أن يستعملها. وكثيراً ما يتضمّن قراره هذا مفاضلة بين مسارين، أحدهما مثير بالنسبة لعالم الرياضيات، والآخر مفيد في فهم العالم الطبيعي. وبالنسبة

لعالم الرياضيات، كان الخيار واضحاً: عليه أن يهجر أي علاقة مع الطبيعة. وفي النهاية، يواجه تلامذته الخيار نفسه، ويتخذون القرار عينه.

لم تسر تلك الأمور في مكان كما فعلت في فرنسا، وبأكثر مما تخيّل مؤسسو عصبة بورباكي. لقد تحوّلت مفاهيمها وأسلوبها إلى قواعد مُلزمة. وحقّقت نجاحها المنقطع النظير بفضل سيطرتها على عقول أفضل الطلبة، وهذا ما ضمن تدفق تيار من علماء الرياضيات الناجحين. لقد سيطرت مجموعة بورباكي على الـ«ايكول نورمال» بصورة مطلقة، مما شكل ضغطاً لا يُطاق بالنسبة لماندلبروت. وهجرها. وبعد عقد من الزمن، هاجر من فرنسا للسبب عينه، فلجأ إلى الولايات المتحدة. وخلال بضعة عقود، شرع التجريد الصارم لمجموعة بورباكي في التلاشي نتيجة الصدمة التي أحدثها الكومبيوتر بقدرته على إظهار نوع جديد من الرياضيات، إلى الأعين. لكنه أمر حدث بصورة متأخرة بالنسبة لماندلبروت، الذي لم يستطع التعايش مع شكلانية بورباكي، ولم يرغب في ترك حدسه الهندسي.

آمن ماندلبروت بأن عليه ابتكار أسلوبه الخاص، لذا فقد ذيّل الموجز عن سيرته في موسوعة «من هو من؟» بعبارة تقول: «إن العلم يُدمّر إذا أعلى شأن التنافس (كحال الرياضة) على كل شيء آخر، وكذلك إذا تعيّن عليه أن يبيّن قواعد المنافسة عبر الانسحاب إلى تخصّصات مُحددة بصورة ضيقة. إن القلّة من الأكاديميين التي لا تحد تُلزم نفسها بحدود التخصّصات، كأنهم اختاروا أن يكونوا بدواً رُحّلاً، باتت ضرورية لتطور تلك التخصّصات الراسخة نفسها». إن ذلك البدوي اختيارياً، والذي يصف نفسه كطليعي ضروري، انسحب من العمل الأكاديمي الصرف عندما هاجر من فرنسا مرتضياً اللجوء إلى قسم البحوث في شركة «أي بي أم». وفي رحلة استمرت ثلاثين سنة، عبر فيها ماندلبروت إلى الشهرة، لم يشهد البتة عملية تبنٍّ لأعماله من أي تخصّص علمي. وحتى علماء الرياضيات، ومن دون سوء نية، لم يعتبروه واحداً منهم.

ووجد طريقه ببطء، بمساعدة معلوماته الواسعة عن تاريخ العلم. واقتحم مجال

اللغويات الرياضية، كشارح لقانون عن توزيع الكلمات. (ومع الاعتذار للتشبيه، فقد أصر على أن تلك المسألة خطرت له عندما قرأ مراجعة لكتاب حصل عليها من سلة مهملات أحد الاختصاصيين في الرياضيات البحتة لكي يجد ما يتسلى بقراءته أثناء ركوب المترو في باريس). واستطلع مجالات «نظرية اللعب». وعمل مراراً في الاقتصاد. وكتب عن عدم الانتظام في توزيع المقاييس بين المدن الكبيرة والصغيرة.

وبقي الرابط بين أعماله كامناً في عدم اكتمال تأهيله أكاديمياً. فعند بداية عمله في شركة «أي بي أم»، مباشرة عقب درسه أسعار السلع، تصدى لمشكلة عملية أرّقت رئيس شركته طويلاً. فقد ارتبك المهندسون بشأن التشويش الذي يرافق نقل المعلومات من كومبيوتر إلى آخر، باستعمال خطوط الهاتف، إذ تنتقل تلك المعلومات ضمن تيار كهربائي على هيئة حزم منفصلة. وتعلم المهندسون أن زيادة قوة التيار الكهربائي تُحسّن من نقل المعلومات، وتخفض درجة التشوش. لكنهم وجدوا أن بعضاً من التشوش لا يزول إطلاقاً. وبين فترة وأُخرى، يضرب التشوش حزم المعلومات، وهذا ما يُحدث أخطاء في الكومبيوتر.

وعلى الرغم من أن التشوش في نقل المعلومات عشوائي بطبيعته، فإنه يحدث في تجمعات، بحيث تتبع التشوش فترات من النقل النقي للمعلومات.

وفي حديثه مع المهندسين، علم ماندلبروت بوجود تبرير شائع للأخطاء، لكنه لم يكتب قط لأنه لا يتطابق مع معايير التفكير. ويفيد ذلك التبرير أن التحليل المُعمّق لتجمعات التشوش يُظهر أنها أكثر تعقيداً مما تبدو. ومع ذلك بدا الأمر غريباً، لأنه يمنع احتساب معدل عن نسبة حدوث الأخطاء، مثل عدد الأخطاء التي تحدث في فترة زمنية مُحدّدة. وباحتساب المعدل، بحسب مقاربة ماندلبروت، بدت الأخطاء متناثرة. ونجح في التوصّل إلى وصف مُناسب عبر تعمّقه في الفرق بين فترات التشوش والصفاء. لنفترض أنك ابتدأت من تقسيم اليوم إلى ساعات. قد تمر ساعة من دون تشوش، تليها ساعة من التشوش. ولكن، إذا قسّمت الساعة التي تحتوي على تشوش إلى فترات أصغر، مقدار كل منها عشرون دقيقة، فستجد أيضاً تناوباً بين فترات التشوش والصفاء. وخلص

ماندلبروت للقول، وعلى عكس الاستنتاج البديهي، إنك لا تصل البتة إلى وقت تكون فيه الأخطاء موزّعة بصورة مستمرة.

فضمن أي دفقة من الأخطاء، يمكن العثور على فترات متناوبة من التشوش والصفاء، مهما تكن قصيرة. واكتشف أيضاً علاقة هندسية متناسقة بين دفق الأخطاء وفترات النقل الصافي.

فعلى مستوى الساعة والثانية، بقيت العلاقة بين الفترتين ثابتة. وذات مرة، ارتعدت فرائص ماندلبروت فزعاً عندما خرجت إحدى الفترات عن تلك القاعدة. وسرعان ما تبيّن أن الخلل عائد إلى إهمال من المهندسين. وعلى عكس اختصاصيي الرياضيات، لم يَفُتْ هؤلاء دوماً الإطار الذي يعمل به ماندلبروت. ففي الحصيلة، لم يكن عمل الأخير سوى تكرار لما يُسمى في الرياضيات الحديثة «مجموعة كانتور»، على اسم عالم الرياضيات الشهير غريغور كانتور الذي ابتكرها في القرن التاسع عشر. ولصنع تلك المجموعة، يجب كتابة مجموعة الأرقام التي تفصل بين الصفر والواحد، والتي يمكن تمثيلها بخط مستقيم، ثم تزيل الثُلث الذي في المنتصف. ويتبقى ثلثان، فتزيل الثلث الذي في منتصف كل منها (من التُسع إلى التُسعَين، ومن سبعة أتساع إلى ثمانية أتساع)، فيتبقى أربع قطع من الخط. ثم تزيل الثلث الذي في منتصف كل من القطع الأربع، وهكذا. ما الذي يتبقى؟ بعض «غبار» النقاط التي تنتظم في مجموعات متناهية الصغر. لقد فكر ماندلبروت في الأخطاء في نقل المعلومات باعتبارها تطبيقاً لفكرة مجموعة كانتور على زمن النقل. ولكن، تُولّد هذه الفكرة المُجرّدة إملاءات عملية بالنسبة لعلماء يحاولون المفاضلة بين استراتيجيات متباينة في السيطرة على الخطأ. فقد فهم المهندسون من وصف ماندلبروت بأنه من غير المجدي عملياً السعي إلى إزالة التشوش عبر زيادة قوة التيار الكهربائي، وبأنه يجدر الاكتفاء بتيار متوسط القوة مع التسليم بحتمية الخطأ، وبالتالي السعي إلى إمساك حُزم المعلومات وإعادة بثها، بعد حدوث الخطأ. وغيّر ماندلبروت في نظرة مهندسي شركة «أي بي أم» عن التشوش. فقد درجوا على تفسير

التشوّش بحدوث خطأ ما في إحدى قطع الكومبيوتر. واقترح ماندلبروت أن من غير المُجدي التفكير بهذه الطريقة.

عمل ماندلبروت أيضاً على نوع آخر من المعلومات، جاءه من الأنهار هذه المرّة. فقد دأب المصريون على الاحتفاظ بسجلات دقيقة عن التقلّب في مستوى منسوب المياه في نهر النيل. وتمتد سجلاتهم أكثر من ألف عام. ويُظهر النيل تقلبات كبيرة في مستويات مياهه، بحيث يفيض في سنوات ويتراجع في أخرى.

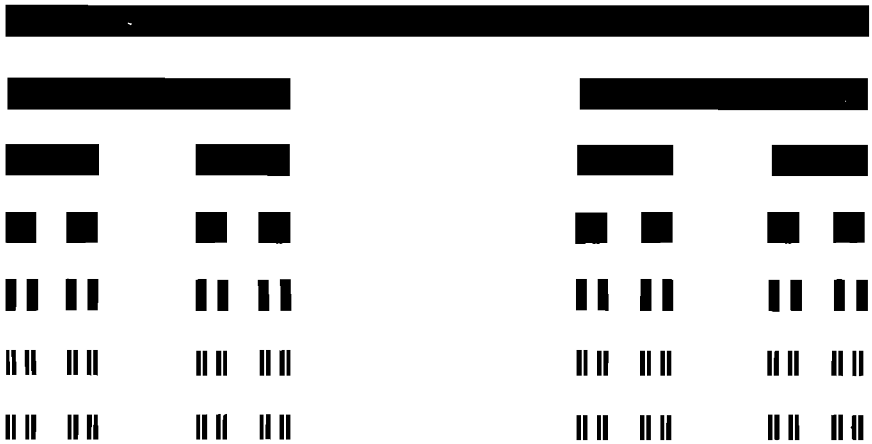
ولذا، عمد ماندلبروت إلى تقسيم تلك التقلّبات إلى نوعين، بالاقتباس من علم الاقتصاد، يُسمّيان «تأثيري نوح ويوسف». يمثّل «تأثير نوح» التَقَطّع (غياب الاستمرارية)، ويشير إلى إمكان تغيّر الكمية بسرعة واعتباطياً.

وتقليدياً، درج الاقتصاديون على التفكير في تقلّبات الأسعار باعتبارها تغيّرات «سلِسَة». فبغض النظر عن مقدار التقلّب، فإن السعر يمرّ في مراحل قبل استقراره على المستوى التالي. ولقد استقوا تلك الصورة عن الحركة من الفيزياء، شأن الكثير من الرياضيات التي تُطبّق على الاقتصاد. ولكنها ليست صحيحة. فقد تتقلّب الاسعار بقفزات فجائية، كأن ينطلق خبر ما فجأة فيغيّر المستثمرون آراءهم.

وحاجّ ماندلبروت بأن إرساء استراتيجية السوق على صورة التقلّب السلس في الأسعار، يقود إلى الفشل، لأنها تقود إلى الاعتقاد في إمكان بيع السهم بخمسين دولاراً أثناء هبوط سعره فجأة من ستين إلى عشرة دولارات، الأمر الذي لا يحدث عملياً.

في المقابل، يشير «تأثير يوسف» إلى الإصرار (بقاء الاستمرارية). ويستقى اسمه من نبوءة يوسف الشهيرة بأن تشهد مصر سبع سنوات سمان تليها سبع عجاف.

وتحمل رواية يوسف معنى التقلّب الدوري، وإن بصورة مُبسّطة. لكن الفيضان والجفاف يستمران. وعلى الرغم من طابعهما الدوري، فإن المناطق التي تُعاني الجفاف تكراراً، تُصبح أكثر ميلاً لمعاناة المزيد منه. وأدى التحليل الرياضي لسجل منسوب النيل إلى أنه يستمر عبر القرون كما عبر العقود.



غبار كانتور: نبدأ من خط، ثم نزيل ثلثه الأوسط، ثم القسم الأوسط من الأقسام الباقية، وهكذا. في الحصيلة، نصل إلى «مجموعة كانتور»، التي تشبه الغبار بكثرتها، لكنها من دون طول. أرّقت التناقضات التي تتضمنها «مجموعة كانتور» علماء الرياضيات في القرن التاسع عشر. واستعملها ماندلبروت لتفسير التشوّش في نقل المعلومات في الكومبيوتر، حيث تتعاقب فترات من النقل الصافي مع التشوش. فعندما حلّل فترات التشوّش، وجد أنها تتضمن أيضاً تعاقباً بين فترتَي النقل الصافي والتشوش وهكذا. ويُعطي ذلك مثالاً عن «الوقت المُتكسّر» أو بالأحرى الوقت «المتكرر والمتغيّر» دوماً، أي «الوقت الفراكتال». ويُشبه نقاط الغبار في «مجموعة كانتور»، والتي رأى فيها ماندلبروت ضرورة لحدوث التقطّع.

يدفع تأثيرا نوح ويوسف في اتجاهين مُتباينين، لكنهما يتقاطعان عند هذه الخُلاصة: تظهر الأنماط في الطبيعة، لكنها تختفي بمثل سرعة ظهورها.

ولكن، لم تنل ظواهر مثل التقطّع، ودفقات التشوش، وغبار كانتور مكاناً في الهندسة خلال ألفي سنة. وتتألف أشكال الهندسة التقليدية من الخط والسطح المثلث والكرة والقُمع؛ وتُمثّل تجريدات قوية عن الواقع، من منظور الفلسفة الأفلاطونية، المهجوسة بالتناغم. وصنع منها إقليدس هندسة دامت ألفي عام، ولم يدرس كثيرون سواها. وعثر الفنانون فيها على جمال مثالي. واستخدمها الفلكيون ممن اتبعوا أفكار بطليموس في بناء نموذج عن الكون. ولكن تلك التجريدات لا تصلح في فهم الظواهر المُعقّدة. لا تُشبه الغيوم الكُرات، ولا الجبال القُمع، ولا يسير البرق في خط مستقيم، كما ألِفَ ماندلبروت القول. إن الهندسة الجديدة تعكس كوناً خشناً وليس ناعماً، قاسياً وليس كروياً. إنها

هندسة المتقطّع والمشوش والمشرشر والمتداخل والمعقد والملتوي. لكي يظهر فهم جديد عن الطبيعة، استلزم الأمر إثارة الشك بأن التعقيد ليس عشوائياً، ولا ينجم من المصادفة.

وتطلب الأمر أيضاً الايمان بأن أكثر الملامح أهمية في ممر البرق، مثلاً، ليس في اتجاهه بل في تشعّبه وتعرّجه. استندت أعمال ماندلبروت إلى زعم مفاده أن الأشياء الغرائبية هي من هذا العالم أيضاً، وأنها تحمل دلالة مهمة. إن النُثر والعُقد ليست مجرد تشوش والتواء في مسار الهندسة الإقليدية؛ بل هي غالباً تحمل المفتاح لما هو أساسي. ما الذي يصنع الشاطئ؟ طرح ماندلبروت هذا السؤال في إحدى أوراقه التي شكّلت نقطة تحوّل في تفكيره عن سؤال من نوع: «كم يبلغ طول شواطئ بريطانيا؟».

شرع ماندلبروت في تأمل مسألة الشاطئ، بعد قراءته مقالاً للعالم الانكليزي لويس ريتشاردسون يلامس مجموعة من المسائل التي أسّست لظهور نظرية الفوضى.

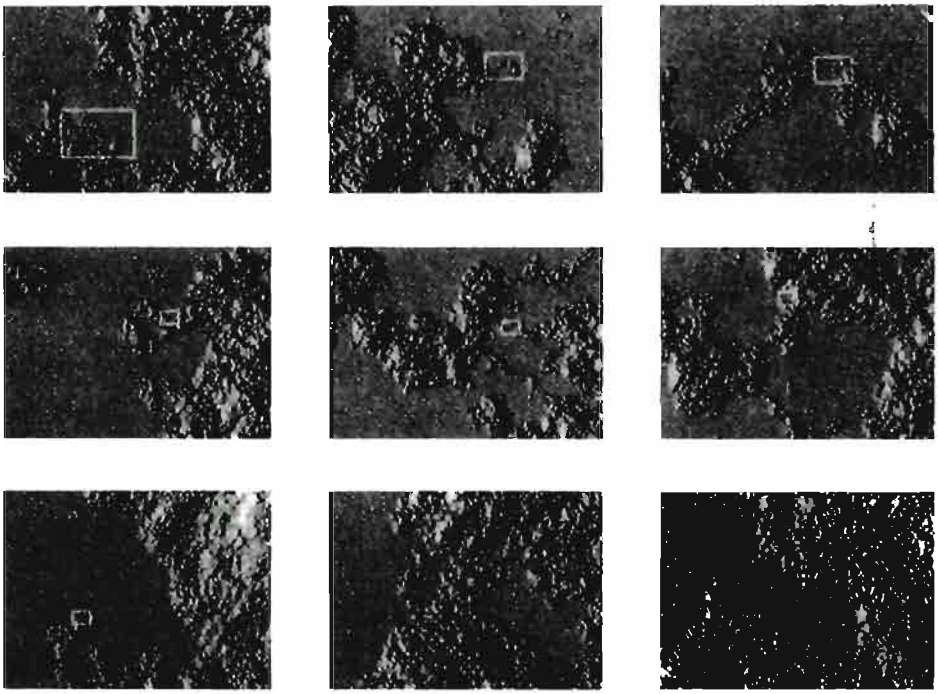
كتب ريتشاردسون عن أرقام توقعات الطقس خلال عشرينات القرن العشرين. ودرس تموّجات السوائل في «قناة خليج سمك القُد». كتب ورقة في العام ١٩٢٦، طرح فيها السؤال الآتي: «هل تملك الرياح سرعة؟».

ولاحظ أن السؤال يبدو غبياً في البداية، لكن الانطباع عنه يتحسّن لاحقاً. وتأمل الشواطئ وتعرجات الحدود بين الدول، وراجع موسوعات بشأن الحدود بين إسبانيا والبرتغال، وبين بلجيكا وهولندا. واكتشف تفاوتات بنسبة عشرين في المئة بين التقديرات المختلفة عن طول الحدود.

وصُدم كثيرون بتحليل ماندلبروت للسؤال عما يُكوّن جوهر الشاطئ، فاعتبروه إما متحذلقاً أو زائفاً. ووجد أن معظم الناس يجيبون عن ذلك السؤال إما بالتنصل من الإجابة، وإمّا بإعلان عدم معرفتها.

وفعلياً، حاجّ ماندلبروت بأن أي خط ساحلي، بمعنى ما، هو لا متناه في الطول.

وبقول آخر إن الجواب عن طول الشاطئ يعتمد على طريقة قياسه. فمثلاً، لنتخيّل أن



الشاطئ المُتكرّر المُتغيّر: صور من صنع الكومبيوتر عن الساحل. تظهر معظم التفاصيل عشوائية، لكن أبعاد التكرار المتغيّر ثابتة، لذا فإن درجة «خشونة» الشاطئ، بالأحرى عدم انتظامه، تبدو ثابتة، بغض النظر عن درجة تكبير الصور.

مسّاحاً يسير على الشاطئ ويغرس عصاً في كل مترين منه، يحصل على قياس تقريبي لطول الشاطئ، لأنه لا يقيس التعرجّات التي تقل عن المترين. وإذا كرر المسّاح نفسه تلك العملية، وصغّر المسافة إلى متر، فسيحصل على رقم آخر، أكثر دقّة. ثم إذا كرّر العملية عينها، جاعلاً المسافة بين العصي نصف متر، فإنه يصل إلى قياس آخر. إن هذا التدريب الذهني، باستعمال عصيّ المسافات مع تغيير المقياس، يفيد في فهم أثر طريقة المُلاحظة ونوع المقياس، على النتائج. إن مُراقباً يحاول قياس طول الشاطئ الإنكليزي الشديد التعرّج، من الأقمار الاصطناعية يتوصّل إلى نتيجة أكثر تقريبية من مسّاح يسير مع كل انثناء في ذلك الشاطئ، وأقل أيضاً من حلزون يزحف عبر أدق التعرجات!

تشير البداهة إلى أن تلك الأرقام، وعلى الرغم من التباعد المستمر فيما بينها، تقترب

من قيمة محددة هي الطول الفعلي للشاطئ الإنكليزي. وبكلام آخر، فإن القياسات تتجه نحو التقارب. وفي الحقيقة، فلو اتخذ الشاطئ هيئة أحد الأشكال الإقليدية، مثل الدائرة، فإن حساباتها لن تبتعد كثيراً عن قياس محيطها عبر سلسلة من الخطوط المستقيمة الصغيرة. وفي المقابل، لاحظ ماندلبروت أنه كلما صغر المقياس، ارتفعت القيمة النهائية لطول الشاطئ الإنكليزي بصورة كبيرة؛ إذ يتضمّن كل خليج وشبه جزيرة، مجموعات لا حصر لها من الخلجان وأشباه الجُزر. وربما لا تصل تلك العملية إلى حدّها النهائي إلا إذا وصلنا إلى تخوم الذرات!

إن القياسات الإقليدية، الطول والعمق والسماكة، تفشل في التقاط الشيء الجوهري في الأشكال غير المنتظمة. ولذا، استدار ماندلبروت صوب فكرة أُخرى هي الأبعاد، التي يفهم العلماء دلالاتها أكثر مما يفعله سائر الناس. فمن السائد القول إننا نعيش في كون ثلاثي الأبعاد تمتلك فيه الأشياء طولاً وعرضاً وارتفاعاً. وبتعبير آخر، فلتحديد نقطة معينة، يجب استخدام ثلاثة أرقام تدل على تلك الأبعاد الثلاثة.

وفي الرسوم البيانية، تظهر الأبعاد الثلاثية على هيئة ثلاثة محاور تتقاطع في زوايا قائمة. يرتكز هذا المفهوم على الهندسة الإقليدية، حيث الفضاء ثلاثي الأبعاد، والمسطح له بُعدان، والنقطة صفر. تجد الأفكار الواردة في الهندسة الإقليدية ما يوازيها في الحياة اليومية بسهولة. فتُرسم خرائط الطُّرُق ببُعدين على مسطح ورقي، وتحمل معلومات لها بُعدان أيضاً. وتملك خريطة الطريق أبعاداً ثلاثية في العالم الواقعي، لكن البُعدين يكفيان ليدلان إلى أوضاعها. وتبقى الخريطة الورقية محتفظة بمعلوماتها وإن طُوِيَت. ومن الناحية العملية، يُنظر إلى الخيط على أنه ذو بعد وحيد، كما يفيد النظر إلى ذرة الغبار باعتبارها من دون أبعاد.

وفي المقابل، ما هي أبعاد طابة مُلتفّة مثل العُقدة؟ يتوقف الأمر على طريقة النظر إليها، بحسب رأي ماندلبروت. من مسافة بعيدة، تبدو مثل نقطة، من دون أبعاد. مع الاقتراب منها، يظهر أن الطابة تملأ فراغاً كروياً، وهذا ما يُعطيها أبعاداً ثلاثية. مع الاقتراب أكثر،

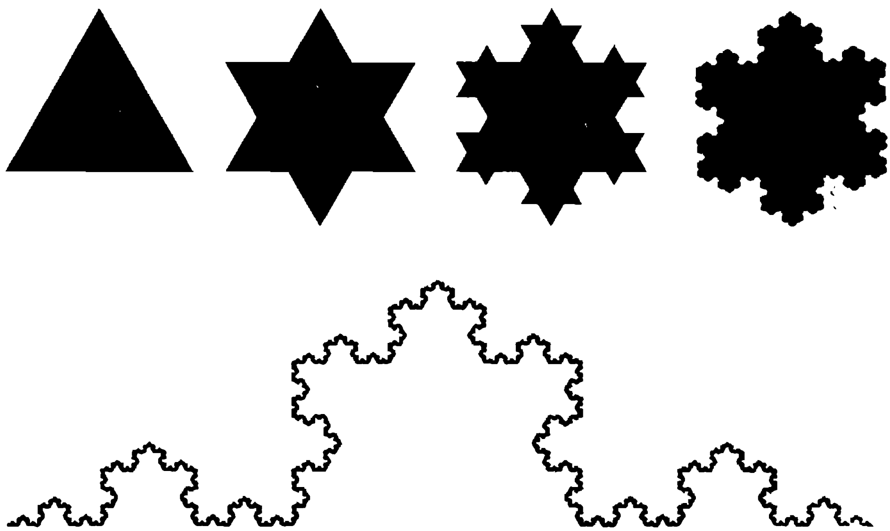
يظهر الالتواء، وتبدو كأنها ببعد وحيد لكنه مُلتف حول نفسه بحيث يبدو وكأنه يملأ فراغاً ثلاثي الأبعاد.

ويفيد مفهوم تحديد النقطة بمجموعة من الأرقام. من قرب، تكفي ثلاثة أرقام. مع مزيد من القُرب، يكفي بُعد واحد لتحديد موقع أي نقطة على الالتواء، سواء عُقد على هيئة كرة أو حُلّ ليعود خطّاً.

ويمكن الانطلاق من ذلك المثال، للحديث عن الميكروسكوب. فتحت عدساته، تظهر العقدة على شكل أعمدة ثلاثية الأبعاد، ثم تظهر الأعمدة كمجموعة من الخيوط الرفيعة التي كأنها من دون أبعاد. وهكذا، حوّل الميكروسكوب الشكل الثلاثي الأبعاد إلى أشياء من دون أبعاد. لذا، لجأ ماندلبروت إلى مفهوم النسبية. واعتبر أنه: «يجدر التنبّه إلى المفهوم القائل بأن النتيجة العددية يجب أن تعتمد على علاقة الشيء مع من يُراقبه ويقيسه. إن ذلك المفهوم يعتبر لبّ الفيزياء الحديثة».

وإذا نحّينا الجانب الفلسفي، فإن البُعد المؤثر لشيء ما يختلف عن صيغة الأبعاد الثلاثية الجامدة. وتُظهر مُحاجّات ماندلبروت وهناً لغوياً بسبب اتكائها إلى مفاهيم غائمة مثل «من بعيد» و«من مسافة أقرب قليلاً». ماذا يكون الحال بين هذين الوضعين؟ بالطبع، ليس هنالك حدود فاصلة تتغير عندها العقدة من شيء ثلاثي الأبعاد إلى شيء ذي بعد وحيد.

والمفارقة أن هذا الغموض في الانتقال بين الأبعاد قاد إلى تفكير من نوع جديد في مسألة الأبعاد نفسها. فقد التمع في ذهن ماندلبروت ضرورة تجاوز عدد الأبعاد، للوصول إلى شيء يبدو مستحيلاً: «الأبعاد التكرارية المُتغيّرة»، وبالمصطلح التقني «أبعاد فراكتال»، التي تتطلب قدرة هائلة على التفكير النقدي والتشكيكي، لمجرد ملامسة مفهومها. وأثبتت أنها مفيدة تماماً. وباتت الأبعاد التكرارية المتغيرة طريقة لقياس صفات لم يكن لها وصف واضح، مثل درجة الخشونة أو التكسّر أو اللاانتظام في الأشياء. ومثلاً، إن شاطئاً متعرّجاً، على رغم طوله اللانهائي، يحوز درجة من الخشونة. وحدّد ماندلبروت



«ندف كوخ» أو «النموذج التقريبي النشط للشاطئ المُتعرّج»، بحسب كلمات ماندلبروت. لكي نرسم «منحنى كوخ» نبدأ بمثلث، ثم نضيف مثلثاً إلى كل ضلع من أضلاعه. ونكرر العملية باستمرار. تصبح المثلثات أصغر باستمرار أيضاً، ومع ذلك تبقى المساحة أقل من مساحة الدائرة التي تُحيط بالمثلث الأصلي. وبذا نحصل على خط لا متناه في الطول، يحيط بمساحة مُحددة.

طرقاً لقياس الأبعاد التكرارية المتغيّرة في الكثير من الأشياء العادية، انطلاقاً من بعض تقنيات إنشاء الأشكال، أو من بعض المعلومات. وترك لهندسته الجديدة حرية العمل على الأنماط غير المنتظمة التي لاحظ وجودها في الطبيعة. وفي تلك الهندسة عينها، بدا أن درجة اللاانتظام تبقى ثابتة، عبر مقاييس متفاوتة. وسرعان ما استطاع إثبات تلك المقولة. ومُجدداً، وتكراراً، أظهر العالم أنه يحتوي على الكثير من عدم الانتظام المنتظم. وذات ظهيرة شتوية من العام ١٩٧٥، قرّر ماندلبروت استنباط اسم لهذه الهندسة الجديدة بأشكالها وأبعادها غير المألوفة، والتي لم تكن معروفة سابقاً. ومع عودة ابنه من المدرسة، وجد نفسه يُقلّب صفحات قاموس الصبي للغة اللاتينية. وعثر على اشتقاق من كلمة «كسر عُشري» باللاتينية، هو «فراكتوس». وسرعان ما أطلق على تلك الهندسة الجديدة اسم «فراكتال».

وفي التفكير المُجرد، يمكن النظر إلى الفراكتال Fractal (التكرار المُتغيّر) كطريقة لتأمل اللانهائي. لنتخيّل مثلثاً، ثم لنضع مثلثاً على كل ضلع منه. نحصل على نجمة سُداسية.

نضع مثلثاً على كل ضلع من مثلثاتها، ثم نُكرر تلك العملية المرة تلو الأخرى. ويصبح الشكل أشد تناثراً، كمثل حال «مجموعة كانتور»، وشبيهاً بندف الثلج، أو ما يُسمى «مُنحنى كوخ» (أو «شكل كوخ»)، تيمّناً باسم عالم الرياضيات السويدي هيلغ فون كوخ، الذي وصفها للمرة الأولى في العام ١٩٠٤. وبات واضحاً نظرياً أن «شكل كوخ» له مزايا مثيرة. إذ يمثّل خطاً متصلاً لا يتقاطع مع نفسه إطلاقاً لأن المثلثات التي تُضاف إلى الأضلاع تتضاءل باستمرار بحيث لا يتراكم بعضها فوق بعض.

وعند كل تكرار، تُضاف مساحة صغيرة في داخل المنحنى، لكن مجموع المساحة الكليّة يبقى ثابتاً، فلا يزيد كثيراً على مساحة الدائرة التي يمكن رسمها لتُحيط بالمثلث الأصلي.

ومع ذلك، فان الشكل له طول لا متناه. ولو تُرجم إلى الهندسة الإقليدية لأصبح مُساوياً لخط مستقيم يعبر الكون. ففي أول تغيير، أي عند الانتقال من المثلث إلى النجمة السُّداسية، يتضاعف مجموع الأضلاع، أي طول الخط المُكوّن للشكل، بمقدار أربعة أضعاف. وفي كل تكرار، يزيد مجموع الطول بمقدار ثلاثة أضعاف. وهكذا، نصل تدريجاً إلى نتيجه نهائية قوامها خط لا متناه الطول في فضاء محدود. وأربكت هذه النتيجة علماء الرياضيات في مطلع القرن العشرين. ونُظُر إلى «شكل كوخ» كوحش أسطوري، لأنه يُبدّد الحدس المنطقي عن الخطوط والأشكال.

وتوصّل بعض علماء الرياضيات المُجدّين إلى تخيل أشكال أشد غرائبية من «منحنى كوخ». فظهر «شكل بايانو»، و«سجّادة سيربنزكي» و«حِشية سيربنزكي». ولصنع سجادة، يمكن البدء بمربع، ثم قسّمه إلى تسعة أقسام متساوية، ثم أزال القسم الذي في منتصفها. ثم كرر العملية عينها مع كل من المربعات الثمانية المتبقية، ودوماً مع إزالة القسم الذي

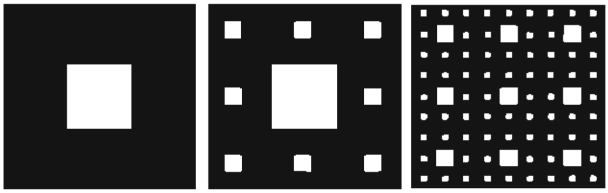
في الوسط. وتُصنع الحِشية على غرار السجادة، لكن انطلاقاً من مثلث متساوي الأضلاع، مما يولّد شكلاً يصعب تخيّله لأنه يثبت أن أي نقطة اعتباطية تُصبح نقطة متفرعة وبتركيب شبيه بشوكة الطعام. ربما يصعب تخيلها من دون مساعدة برج إيفل، الذي يصلح كتقريب ثلاثي الأبعاد للشكل الذي تصنعه شبكة من الأشكال الصغيرة. ولم يكن ممكناً، بالنسبة إلى مهندس البُرج، أن يجسّد شكلاً لا نهائياً، لكنه يُظهر إمكان إزالة الكثير من الوزن، من دون التأثير على التركيب العام وقوته.

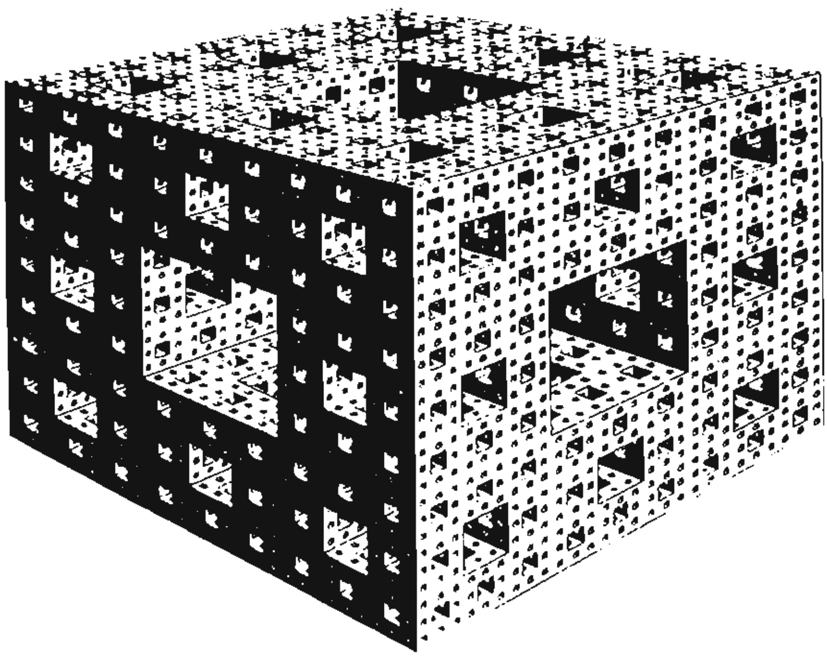
ويصعب تخيّل التراكيب المُتضمّنة في الأشكال المُعقّدة. ومن الوجهة الهندسية، فإن البنية المصنوعة من تراكيب تتكرر وتتضاءل باستمرار، يمكنها أن تفتح الباب على عالم واسع. إن استكشاف تلك الأشكال واحتمالاتها الهائلة، يشبه نوعاً من اللعب الخيالي. ولذا، شرع ماندلبروت في اللعب، كأنه طفل، في استنباط تنويعات على الفكرة الأساسية للهندسة الجديدة التي ابتكرها. وعندما أعوزته الأسماء، لجأ إلى مسميات شائعة: الحبال والشراشف، والإسفنجة والرغوة، والقشدة والحِشية.

وأثبتت الأبعاد التكرارية المُتغيّرة أنها أداة فاعلة. فبمعنى ما، يتوازى تعقيد شكل ما مع فعلية «استعمال» ذلك الشكل للفضاء الذي يوجد فيه.

وفي المقابل، فإن الخط ذا البُعد الواحد لا يحتل حيّزاً البتة، بموجب مقولات الهندسة الإقليدية. لكن المظهر العام لـ«شكل كوخ»، حيث يتجمع طول لا متناه في مساحة محدودة، ما يعطي حيّزاً لذلك الخط. لقد أصبح أكثر من خط، لكنه أقل من مسطح؛ أكبر من بُعد وحيد، وأقل من بُعدين.

وباستعمال التقنيات التي طوّرها علماء الرياضيات في مطلع القرن العشرين، ثم نُسيت، استطاع ماندلبروت أن يُعطي ميزات دقيقة للبعد التكراري المُتغيّر (بُعد الفراكتال). وتبيّن له أن «شكل كوخ»، الذي يتألف من تكرار ممتد لعملية ضرب بأربعة أثلاث، يملك بُعد فراكتال قدره ١,٢٦١٨. وبمتابعة الخط عينه، تفوق ماندلبروت بميزتين كبيرتين على غيره من علماء الرياضيات ممن فكّروا بأشكال مُشابهة. فقد امتلك مدخلاً





تراكيب ذات ثقوب: في مطلع القرن العشرين، استوعبت نخبة من علماء الرياضيات التراكيب الوحشية الهائلة التي تنجم عن التقنية التي ترتكز إلى إضافة أو حذف أجزاء صغيرة بشكل تكراري. تعتبر «سجّادة سيربنزكي» أحد تلك الأشكال. وتُصنع بتقسيم المربع إلى تسعة أقسام، ثم إزالة المربع في الوسط، ثم تكرار العملية عينها في المربعات الثمانية الباقية، وهكذا. أما هذا الشكل الثلاثي الأبعاد فاسمه «إسفنجة مينجر». ويملك مساحة سطحية لا متناهية، لكن حجمه قريب من الصفر.

إلى الكومبيوترات القوية في شركة «أي بي أم»، بقدراتها المتفوقة في الحسابات المُعقّدة. ومثلما احتاج علماء المناخ إلى قدرة الكومبيوتر على إجراء عمليات حساب تتكرر بصورة مُضنية لحساب ملايين النقاط في الغلاف الجوي، احتاج ماندلبروت تلك القدرات عينها لإجراء الحسابات اللازمة عند كل تكرار للخطوات الهندسية التي تخيّلها، ثم لتحوّلها رسوماً فائقة الدقة. وهكذا آزرت قدرات الكومبيوتر عبقرية الخيال الهندسي، لتحوّلها إلى رسوم عيانية. وأدى الأمر أحياناً إلى نتائج لم تكن في الحسبان.

ففي مطلع القرن العشرين، كانت الحسابات تصل إلى جدار مسدود بسرعة، كمثل الجدار الذي واجهه علماء البيولوجيا عندما عملوا على الظاهرة الحيّة بأعينهم قبل اكتشاف الميكروسكوب. ففي تأمُّل عالَم لا متناه في الصغر، لا يسعف الخيال إلا قليلاً. وبحسب تعبير ماندلبروت: «هناك فجوة قدرها مئة سنة، لم تلعب فيها الرسوم دوراً أساسياً في الرياضيات، لأن العلماء استنزفوا قدرات القلم والورقة والمسطرة. لقد تُخيّلت أشكال كثيرة، لكنها لم تُرسم لأن الكومبيوتر لم يكن موجوداً... عندما تعرفت إلى الكومبيوتر، لم يكن هناك حدس في رسومه. تعيّن بناء ذلك الحدس من لا شيء. إن الحدس الذي يولّده التدريب على الأدوات التقليدية؛ اليد والمسطرة والقلم والورقة؛ يرى في هذه الأشكال الجديدة وحوشاً ولّدتها الهندسة التكرارية المُتغيّرة (الفراكتال). ولذا صدمتني الرسوم الأولى، ثم استطعت أن أرى العلاقة بين الصور التالية والسابقة وهكذا دواليك... ليس الحدس شيئاً يُعطى... إنه شيء يجري التدريب عليه. لقد درّبت حدسي على قبول هذه الأشكال التي رُفضت باعتبارها غرائبية. وفي إمكان الآخرين أن يتدربوا أيضاً».

وتمثّلت الميزة الثانية عند ماندلبروت في صورة الواقع التي أخذت تتبلور في ذهنه، من اشتغاله على أسعار القطن، وتقلبات مياه النيل، والتشوّش في نقل المعلومات في الكومبيوتر.

وتقاطعت في خياله صورٌ ولّدتها دراساته عن الأنماط غير المنتظمة في العمليات الطبيعية، وتمعّنه في الأشكال اللامتناهية التعقيد؛ لتُعطيه مفهوماً جديداً: شَبَه الشيء مع

نفسه، بالأحرى الشبه المُتغيّر (الفراكتال) للشيء مع نفسه. إن شبه الشيء مع نفسه، في هذا المعنى، هو تناظر عبر مقياس معين. ويُشير إلى التجدّد، ووجود نمط داخل النمط. فقد أظهرت الرسوم البيانية للكومبيوتر عن أسعار القطن وأرقام تقلبات النيل، هذا النوع من الشبه، لأنها بيّنت التفاصيل على مقاييس أصغر فأصغر، كما أظهرت التفاصيل التي تُصنع بتكرار قياسات ثابتة.

إن الأشكال التي وُصفت بأنها وحوش هندسة التكرار المُتغيّر (الفراكتال)، مثل «شكل كوخ»، بيّنت مفهوم الشبه المتغيّر للشيء مع نفسه، لأنها بدت بالشكل نفسه، حتى مع التكبير العالي. وغدا الشبه المتغيّر تقنية لبناء الأشكال الهائلة التي تنتج من تكرار التحوّل نفسه، مثل تقسيم المربع وحذف أحد الأقسام، على مستويات أصغر فأصغر. وتظهر تلك الصور بوضوح في الثقافة المُعاصرة، مثل الانعكاس المتكرر بصورة لا نهائية لشخص يقف بين مرآتين متوازيتين، أو أفلام الرسوم المتحركة التي تُظهر سمكة تأكل سمكة أصغر منها سبق أن أكلت سمكة أخرى أصغر سبق أن أكلت سمكة أصغر وهكذا.

في شمال شرقي الولايات المتحدة، يمثّل «مرصد لامونت ـ دوهارثي» أفضل مكان لدرس الهزّات الأرضية. ويتألف من مجموعة من المباني التي تخبئها الغابات في جنوب ولاية نيويورك، عند غرب نهر الهدسون. وشهد المرصد انطلاق التفكير في التكرار المُتغيّر في ذهن كريستوفر سكولز، الأستاذ من جامعة كولومبيا الذي تخصص في دراسة الأرض الصلدة وتراكيبها.

ففيما تجاهل علماء الرياضيات واختصاصيو الفيزياء النظرية أعمال ماندلبروت، التقط سكولز تلك الأعمال عن الهندسة التكرارية المُتغيّرة. وقد لفته اسم بنواه ماندلبروت للمرة الأولى في ستينات القرن العشرين، عندما نشر الأخير أعماله عن أسعار القطن. وحينذاك، كان سكولز طالباً في «معهد ماساشوستس للتقنية» ومهتماً بشؤون الهزّات الأرضية. وقد عرف العلماء، لعشرين سنة سبقت، أن توزيع الهزّات الصغيرة والكبيرة يتبع نمطاً رياضياً مُحدّداً، يتشابه تماماً مع نمط توزيع الدخل الفردي في الاقتصاد الحر.

ولوحظ ذلك التوزيع عينه في كل مكان رُصدت فيه الهزّات الأرضية وقيست. ومع الأخذ في الاعتبار الطابع العشوائي للهزّات الأرضية، صار مشروعاً، بالنسبة لسكولز، السؤال عن العمليات الفيزيائية التي تُسبب هذا الانتظام. وتذكّر سكولز اسم ماندلبروت.

وفي العام ١٩٧٨، اشترى سكولز كتاب «الفراكتال: الشكل والفرصة والبُعد» الذي حشد فيه ماندلبروت كل ما يعرفه عن الكون، مع شروح مستفيضة ومُعادلات رياضية كثيفة وأعداد كبيرة من الرسوم. وخلال سنوات قليلة، غدا ذلك الكتاب الذي أُعيد تنقيحه وإصداره بعنوان «هندسة الفراكتال للطبيعة»، أكثر كتب الرياضيات العُليا مبيعاً. وقد تميّز بأسلوبه المُضني وطابعه الغامض، لكنه لم يخل من سرعة البديهة والسخرية. وبحسب تعبير ماندلبروت نفسه، شكّل الكتاب «مانيفستو ومرجعاً».

ومثل قلّة من العلماء المُشتغلين بالشق المادي من الطبيعة، أنفق سكولز سنوات في محاولة تصوّر سُبل للاستفادة من كتاب ماندلبروت عن الهندسة التكرارية المتغيّرة للطبيعة. وجذبه اهتمامه بالأسطح إلى الكتاب الذي جعله بؤرة اهتمامه.

ووجد نفسه مأخوذاً بهاجس الوعود التي تتضمنها أفكار ماندلبروت. وشرع في البحث عن طرق لتطبيق مفهوم الفراكتال على وصف الهزّات الأرضية وتصنيفها وقياساتها. وسرعان ما أدرك أنه لم يكن متفرداً، وعلى الرغم من حداثة مفهوم هندسة التكرار المُتغيّر. فقد جمعت أفكار تلك الهندسة بين علماء من تخصصات متنوعة، لاحظوا أنها قد تساعدهم على نظم الظواهر التي يدرسونها، والتي بدت سابقاً شديدة العشوائية. وساعد مفهوم التكرار المُتغيّر العلماء على درس الطريقة التي تتقارب فيها الأشياء بعضها من بعض، وأيضاً سُبل تشعّبها وتفكّكها وتشظّيها. وبدا كطريقة جديدة للنظر إلى المادة، وللتفكير في أسطح المواد المعدنية التي تظهر شديدة التشعّب تحت الميكروسكوب، وللتأمل في الفتحات والقنوات في الصخور المحتوية على البترول، وللنظر إلى الهزّات الأرضية.

ورأى سكولز في هندسة التكرار المُتغيّر أداة يمكن أن يستعملها علماء الفيزياء الجيولوجية

لوصف سطح الأرض، الذي يولّد تقاطعه مع المسطحات المائية الشواطئ المتعرجة.

وعلى القشرة الأرضية، تهيمن أسطح أخرى مثل الشروخ والفوالق التي أصبحت مفتاحاً للوصف العلمي لتلك القشرة، وخصوصاً من حيث التوازن الذي تؤمنه. وتعبر الشروخ والفوالق قشرة الأرض في الأبعاد الثلاثة مما يصنع أشكالاً درج سكولز على التهكّم عليها بتسميتها «الشكل الكروي المُنفصم». وتتحكم تلك الأشكال بالسوائل التي تجري فيها مثل الأنهار والبحيرات وآبار البترول، إضافة إلى الغاز الطبيعي. وتتحكم أيضاً في الهزّات الأرضية. يُشكّل فهم تلك الأسطح أولوية في العلم الذي يعمل به سكولز، وكذلك فإن ذلك العلم عانى من غياب الإطار المُناسب لفهم تلك الأسطح. فقد نظر علماء الفيزياء الجيولوجية إلى تلك الأسطح باعتبارها أشكالاً. يمكنها أن تميل إلى التسطح أحياناً، كما يمكن أن تتخذ أشكالاً أخرى، مثل احديداب شكل الخنفساء المميز لسيارة الفولكسفاكن التقليدية مثلاً، وعندئذ يُرسم السطح على هيئة منحنى. ويقاس ذلك المنحنى عبر قوانين الهندسة الإقليدية. واعتبر سكولز هذا الفهم ضيقاً، ويُشبه أن نرى الكون عبر مرشح للضوء يُظهر اللون الأحمر، فنرى الكون ضمن موجات ذلك اللون، لكن تغيب عن النظر بقية ألوان الطيف. ويُشبه الطيف في الضوء المقياس في الهندسة. إذا نظرنا إلى سقف الفولكسفاكن عبر الهندسة الإقليدية، أي باعتبارها احديداباً، فسنضعها على مقياس من يراه من عشرة أمتار أو حتى مئة متر. فماذا عمن يراها من بُعد كيلومتر أو عشرة كيلومترات؟ ماذا عمن يراها من بُعد لا يتجاوز الميلليمتر أو الميكرون (واحد من المليون من المتر)؟ لنتخيّل أنك تتطلع إلى محيط الأرض من بُعد مئة كيلومتر في الفضاء. تراه قريباً من شكل احديداب ظهر الفولسفاكن، لأنه على ذلك المقياس، سيبدو مجرد احديداب شبه اعتباطي. أو تخيّل أنك تقترب من الفولسفاكن، إلى حد استعمال المُكبّر والميكروسكوب. في البداية، يبدو السطح أملس، مثل الغطاء والمؤخرة. ومع استعمال الميكروسكوب، يبدو السطح المعدني مؤلفاً من عدد لا متناه من الاحديدابات المعدنية، التي تنتشر بصورة فوضوية.

وجد سكولز أن هندسة ماندلبروت (الفراكتال) تُقدّم طريقة قوية لوصف احديداب سطح القشرة الأرضية. وكذلك استعملها بعض اختصاصيي مزج المعادن لوصف أسطح الأنواع المختلفة من المعادن. كثيراً ما تُعطي الأبعاد التكرارية المتغيّرة لسطح معدن، مثلاً، معلومات عن قوته. وتُعطي الأبعاد الفراكتالية لقشرة الأرض معلومات عن نوعها. وفكّر سكولز في التكوينات الجيولوجية التقليدية، مثل سفح جبل صخري. فمن مسافة متوسطة، يبدو لعين الجيولوجي شكلاً إقليدياً ذا بُعدين. ومع الاقتراب منه، يسير الجيولوجي فيه أكثر من سيره عليه، فقد تفكّك الشكل الإقليدي بحيث يسمح للسيارة بالتوغّل فيه. ويظهر سطحه الصخري مملوءاً بالنتوء كالإسفنجة، وميالاً إلى الأشكال الثلاثية الأبعاد.

وجدت أوصاف الهندسة التكرارية المتغيّرة تطبيقاً مباشراً لها في مجموعة من المسائل التي تتصل بصفات الأسطح التي يلامس بعضها بعضاً. ومثال ذلك التقاطع بين تعرّجات دولاب السيارة والأرض. ومن الأمثلة الأخرى، تروس الآلات والدارات الكهربائية.

ويحوز التلامس بين الأسطح صفات مستقلة عن مادة السطح نفسه. كما يعتمد على مواصفات هندسته التكرارية المتغيّرة.

ولعل إحدى النتائج البسيطة والقوية لهندسة الفراكتال القول إن الأسطح المتلامسة لا «تتلامس» كلياً إذ تمنعها التحدّبات المعدنية الصغيرة من ذلك. وحتى في الصخور التي تُعرّض لضغط كبير، تبقى الفجوات منتشرة على المقياس الصغير، مما يسمح بمرور السوائل. وللسبب عينه، أي لأن الاحديدابات المعدنية الشديدة الصغر تصنع الحدود الفعلية للأسطح، فإن قطعتين من كوب شاي مكسور لا تعاودان الالتحام تماماً كما كانتا سابقاً. وسمى سكولز ذلك «أثر هامبتي- دامبتي»، في إشارة لغوية إلى العشوائية التي تتسم بها تلك الاحديدابات. وسرعان ما ذاع صيته باعتباره من النُخبة التي استطاعت تطبيق تقنيات هندسة الفراكتال الجديدة. ولم يفته أن بعض زملائه ينظر إلى تلك النخبة باعتبارها مجموعة من غريبي الأطوار. وأصبح القرار بكتابة مقال علمي يحمل مصطلح

فراكتال في عنوانه، صعباً لأن البعض سينفر منه فوراً، فيما سينحاز له آخرون لمجرد الإعجاب. وعلى رغم ذلك، نظر سكولز إلى تقنيات هندسة الفراكتال باعتبارها أدوات علمية لا تُضاهى.

ووصفها بالقول: «إنها نموذج مُفرد، لكنه يستطيع أن يتعامل مع مجموعة كبيرة من الأبعاد المتغيّرة للأرض... كما يعطيك أدوات هندسية ورياضية لصنع التوقّعات وتوصيفها... عندما تتملك أدوات النموذج، تستطيع البدء في قياس الأشياء والتفكير فيها، بطريقة مختلفة... يعطيك النموذج الفراكتال فهماً مختلفاً، فترى الأشياء بشكل مُختلف... وتهجر رؤاك السابقة، لأن مفهوم الفراكتال أكثر رحابة».

كم يستمر هذا الشيء؟ كم حجمه؟ يُشكل السؤالان أبسط ما يفكر فيه العلماء. ولعلهما من الأشياء الأساسية في تصوّر كثير من الناس عن العالم، بحيث يصعب عليهم ملاحظة أنهما يتضمنان موقفاً مُسبقاً أو فكرة قَبْلية.

ذلك أنهما يتحدّثان عن الحجم والوقت وهما صفتان تعتمدان على المقياس، وتشكّلان صفتين لهما معنى مُحدّد، وتساعدان في توصيف الأشياء ومن ثم تصنيفها. فعندما يصف عالم بيولوجيا الكائن الإنساني، يستعمل الحجم والوقت كمواصفات أساسية. وكذلك الحال بالنسبة إلى وصف عالم الفيزياء للكوارك في الذرّة. ففي تركيبها الفيزيائي العام، تُظهر الحيوانات ارتباطاً قوياً مع مقاييس مُحددة. تخيّل إنساناً ما بمقياس ضعفي حجمه؛ فإذا لم تتغيّر أشياء كثيرة في تركيبته، فإن عظامه تنهار تحت وطأة وزنه. الأرجح أن المقياس شيء مهم.

وفي المقابل، فإن فيزياء الهزّات الأرضية لا تتأثر بالمقياس. فلا تشكّل الزلازل شيئاً أكثر من هزّة صغيرة على المقياس الكبير. تفصل تلك الميزة بين الحيوانات والهزّات الأرضية، فيقتضي نقل حيوان ما من مقياس مُعيّن إلى خمسة أضعافه مثلاً، إحداث تغييرات نوعية في تركيبته. ويتطلّب نقل مقياسه بمقدار مئة ضعف، تغييرات أكثر جذرية. وفي المقابل، فإن ظاهرة الغيوم تُشبه الهزّات الأرضية، في مسألة المقياس. ولا تتغيّر

سماتها العشوائية المميزة عبر المقاييس المختلفة. لذا، لا يستطيع المسافرون في الطائرات تقدير المسافة التي تفصلهم عن غيمة معينة. وإذا لم يستعملوا مؤشرات مثل الكثافة، فإن غيمة تبعد عنهم عشرين متراً تبدو مثل غيمة تبعد ألفين. وقد أظهر تحليل صور الأقمار الاصطناعية أن الأبعاد الفراكتالية للغيوم لا تتبدل، حتى حين تُرصد من بُعد مئات الكيلومترات.

ومن الصعب كسر عادة التفكير في الأشياء باستخدام مقياسيّ الحجم والزمن. ولكن، تزعم هندسة الفراكتال أنه يجدر نسيان أمر المقياس عند النظر إلى السمات المميزة لبعض عناصر الطبيعة.

فمثلاً، يُشكّل الإعصار عاصفة ذات حجم هائل. يعكس التعريف مفهوم الناس عن الطبيعة، لكنه ليس بالضرورة جزءاً منها. إذ يدرك علماء المناخ، على نحو متزايد، وجود استمرارية في الاضطراب الجوي الذي تنبع منه مظاهر مختلفة، بداية من الريح التي تترنّح في شوارع المُدن وصولاً إلى الأعاصير التي تُرى بالأقمار الاصطناعية. والأرجح أن التصنيف الذي يفصل بينها مُخادِع. ثمة استمرارية بين طرفي الظاهرة اللذين يلتقيان عند منتصفها. وفي الفيزياء، لا تتضمن المُعادلات عن حركة السوائل أي أبعاد، بمعنى أنها قابلة للتطبيق من دون أخذ المقياس في الاعتبار. ولذا، يمكن اختبار الحال السائل على مقاييس مختلفة. ومثلاً، تختبر أجنحة الطائرة ودفّاشات السُّفن في أنفاق وأحواض صغيرة في المختبرات. ومع تحفّظات مُناسبة، تتصرف العواصف الصغيرة مثل الرياح العاتية.

وتُعطي الأوعية الدموية مثالاً آخر من الاستمرارية. وتتدرج ظاهرة سريان الدم من الشريان الأبهر الضخم إلى أصغر الشعيرات الدموية التي لا تُرى إلا تحت الميكروسكوب. إن تشعّب تلك الأوعية، من الأكبر إلى الأصغر، يتّبع مساراً تكرارياً متغيّراً. ويُشبه تركيبها تلك الصور الوحشية التي ابتكرها ماندلبروت عند مطلع القرن العشرين. وتقضي الضرورة الفيزيولوجية بأن تُظهر الأوعية الدموية «مهارة» في تشعّباتها.

وكحال «منحنى كوخ»، ثمة خط لا متناهي الطول تُشكّله الشعيرات الدموية، مضغوط في مساحة مُحدّدة، مما «يُجبر» الجهاز الدوري على ضغط الأسطح الكبيرة في مساحة مُحدّدة. وبالنسبة إلى الجسم، يُعتبر الدم عنصراً مُكلفاً وهذا ما يجعل الحجم مسألة ذات أولوية كبرى. ويُمكّن التركيب التكراري المُتغيّر، الموجود طبيعياً في بنية الأوعية الدموية، من تناقل الدم عبر الجسم كله بكفاءة عالية، بحيث لا تُترك خلية من دون تغذيتها من وعاء دموي لا يبعد عنها سوى المسافة التي تتشكل من ٣ أو ٤ خلايا. ورغم ذلك التشعّب اللانهائي الطابع، لا تحتل الأوعية الدموية أكثر من ٥ في المئة من حجم الجسم. ووصف ماندلبروت الأمر بـ «ظاهرة تاجر البندقية» (في إشارة إلى المسرحية الشهيرة لوليم شكسبير)، فلا يمكن إحداث حزّ دقيق في اللحم من دون إسالة الدم.

إن هذا التركيب الباهر، الذي يتضمن فعلياً شجرتين متشعبتين هما الأوردة والشرايين، ليس استثنائياً في الطبيعة. ويحتوي الجسم على الكثير من النُّظُم المُعقّدة مثل الجهاز الهضمي، حيث تُظهر الأنسجة تلافيف تليها تلافيف. ويظهر أيضاً التعقيد عينه في الرئة، التي تحتاج إلى مساحات ضخمة ضمن حجم محدود. وتتناسب قدرة الحيوان على امتصاص الأوكسجين من الهواء مع إجمالي المساحة الداخلية للرئتين. وتصل المساحة الكليّة للحويصلات الهوائية في الرئتين إلى ما يزيد على مساحة ملعب للتنس. ولزيادة التعقيد، ينبغي رفد تلك المساحة المُعقّدة والهائلة بتشعبات من الأوردة والشرايين.

ويعلم طلبة الطب أن الرئتين مصممتان تصميماً يتيح لهما حيازة أسطح بمساحات ضخمة. وفي المقابل، درج علماء التشريح على التمعّن في كل مقياس على حدة، كنظرهم إلى ملايين الشعيبات والأكياس الهوائية التي ينتهي إليها النظام المُتشعب للأنابيب الهوائية. كما تنحو لغة التشريح إلى التعتيم على الوحدة التي تسود ذلك النظام، عبر مقاييسه كافة. وفي المقابل، يشمل مفهوم الفراكتال، عند استعماله لمقاربة ذلك التعقيد الطبيعي، التركيب الكليّ عبر رصد التشعّب الذي يسير بصورة متناسقة من المقاييس الكبرى إلى الصغرى. ويدرس علماء التشريح نظام الأوعية في الجهاز الدوري

بتصنيفها إلى فئات بحسب الحجم، مثل الشريان والشُريّن والوريد والوُريّد. ويفيد التقسيم في كثير من الأحيان. وفي أحيان أُخرى، تبدو النصوص العلمية وكأنها تتراقص مع الحقيقة. ويورد أحد مراجع علم الأنسجة الآتي: «يصعب أحياناً تمييز المرحلة الانتقالية أثناء التدرج من نوع من الشرايين إلى الآخر. فأحياناً، تملك بعض الشرايين الصغيرة جدراناً تشبه ما يملكه أكبر الشرايين حجماً. وعلى العكس، تبدو جدران بعض الشرايين الكبرى قريبة من التراكيب الموجودة في الشريان المتوسط الحجم. وغالباً ما تظهر المناطق الانتقالية شرايين من أنواع مختلطة».

بعد عقد من نشر ماندلبروت تأملاته عن علم وظائف الأعضاء، شرع بعض علماء البيولوجيا النظرية في اكتشاف أن تنظيم الفراكتال (التكرار المُتغيِّر) منتشر في جسد الكائن الحي. وتبيّن أن وصف تشعب القصبة الهوائية، مثلاً، باعتباره شيئاً مُتدرّجاً، لا يتوافق مع المعطيات الفعلية. وكذلك تبيّن أن نظام تجميع البول في الكلى يتبع هندسة التكرار المُتغيِّر. وينطبق الوصف عينه على تركيب المرارة وقنواتها، وكذلك النظام الكهربائي الذي يتحكّم بدقات القلب. وألهم النظام الأخير الذي يشير إليه الأطباء باسم «شبكة هيس ـ بيركينجي»، نوعاً خاصاً من البحوث.

فقد أظهرت البحوث عن أمراض القلب وسلامته الأهمية الحاسمة لمعرفة الطريقة التي تُنسّق بها انقباضات الخلايا العضلية في الأقسام المختلفة من القلب، مما يكفل ضخّ الدم ودورانه في الجسم. وتبنّى بعض الاختصاصيين في القلب نظرية الكايوس في مقاربة هذه المسألة. ووجدوا أن التدرّج في موجات الكهرباء ضمن شبكة «هيس ـ بيركنجي» يضمن هذا الأمر، لأنه يتّبع نظام الهندسة التكرارية المُتغيّرة.

كيف تأتّى للطبيعة أن تُطوّر مثل هذا النظام الهائل التعقيد؟ حاجّ ماندلبروت بأن التعقيد يظهر كأنه استعصاء لا يُرام، إذا نُظر إليه من وجهة نظر الهندسة الإقليدية.

ورأى أن وصف ذلك التعقيد من منظار الفراكتال، يبدو شفافاً وبسيطاً، فكل ما يلزم هو حفنة من المعلومات.

فلربما وجد الانتقال البسيط الذي يعتمد على تكرار معلومة بعينها كما تُظهره أشكال مُعقّدة مثل «منحنى كوخ» و«شكل بايانو» و«سجادة سيربنزكي» نظائره في نظام المعلومات في جينات الحمض الوراثي للكائن الحي. والأرجح أن من الصعب على الحمض الوراثي أن يتضمن كمّاً من المعلومات لنسج الشبكات المُعقّدة للأوعية الدموية والحويصلات الهوائية والجهاز الهضمي وغيرها. وفي المقابل، فلعلّه من السهل أن تحتوي الجينات على معلومات أساسية تُحدّد طريقة التكرار اللازم لصنع التشعّب المتشابك في تلك الأشجار المُعقّدة. يبدو مثل ذلك التصوّر عملياً. واستعمل ماندلبروت مفهوم هندسة التكرار المُتغيّر لفهم التركيب البنيوي للأشجار، التي تحتاج إلى شبكات متشعبة ولا متناهية، في أغصانها وأوراقها، لالتقاط الطاقة من الشمس ولمقاومة الريح. ومال بعض البيولوجيين للاقتناع بأن المقاييس الفراكتال قد تكون أكثر شيوعاً، بل ربما مثّلت ركناً أساسياً في عملية تكوّن أشكال الكائنات الحيّة. وحاجّوا بأن فهم الأنماط التي تتضمّنها شيفرة تلك الكائنات، بات من التحديات الأساسية في علم البيولوجيا. وساهم ماندلبروت في دفع تلك المفاهيم.

ووصف ذلك بقوله: «لقد بدأت بتأمل الأشياء التي درج العلماء طويلاً على إهمالها، لأنني ارتّبتُ في أن الهندسة التكرارية المتغيرة لم تكن استثناء، وربما كانت شديدة الانتشار. وشرعت في تقليب المجلات، وعلى غير هدى في كثير من الأحيان. وعثرت على بعض الأشياء المُهمة أحياناً. وفي النهاية، كسبت ذلك الرهان». وبعد أن نجح في تكثيف أفكاره المثيرة في كتاب مستقل، حاز ماندلبروت نجاحاً أكاديمياً عزّ نظيره. وبات دائم الحضور في المنتديات العلمية، مع تلك الشرائح الشفافة الملونة التي تعرضها أجهزة العرض لتظهر رسوماً غرائبية الطابع. ونال الكثير من الجوائز العلمية، والتكريم المهني. وذاع صيته في المجتمعات العلمية وخارجها. وعزّز حضوره جمالية تلك الصور عن هندسة الفراكتال وأشكالها؛ إضافة إلى انشغال آلاف المتخصصين في علوم الكومبيوتر باستكشاف عالم هندسة التكرار المُتغيّر.

واندرج في قائمة الأسماء التي صنعت تاريخ العلم، بحسب تعبير المؤرخ برنارد كوهين. فقد اهتم كوهين بتاريخ العلماء الذين أدركوا أن أفكارهم تُمثّل «ثورة». ولم يزد عدد هؤلاء تاريخياً على ستة عشر. ومن هؤلاء تبرز أسماء الاسكتلندي روبرت سايمر الذي وصف أفكاره عن الكهرباء بالجذرية (وكانت مغلوطة كلياً)، جان بول مارا، فون لايبغ، هاملتون، تشارلز داروين، فيرشو، كانتور، ألبرت آينشتاين، مينكوسكي، فون لوه، ألفرد فاغنر، جاست، جايمس واطسن (مكتشف الحمض النووي الوراثي) وبنواه ماندلبروت. وبالنسبة إلى علماء الرياضيات النظرية، ظلّ ماندلبروت غريباً. وفي ذروة نجاحه، لامه بعض زملائه لأنهم لاحظوا أنه صار مهجوساً بمكانه في تاريخ العلم. ورد عليهم بالتشديد على أهمية أن ينال صاحب كل ذي حق حقه. وفي تألقه المهني، اهتم كثيراً بآليات الإنجاز العلمي ومواضيعه. ولم يتورّع عن الاتصال بكتاب المقالات العلمية عن هندسة الفراكتال، شاكياً من إغفال ذكر اسمه أو اسم كتابه.

ومال المعجبون به للتسامح تجاه تضخم الأنا عند ماندلبروت، خصوصاً مع تذكّرهم الصعوبات التي لاقاها في الحصول على قبول المجتمع العلمي لأفكاره. واعتبروا أن ذلك التضخّم يُعطي دفعة للعلم الجديد. والحق أن مسألة الحصول على التقدير المناسب قد تُصبح هاجساً لدى العلماء أحياناً. وبرز ذلك بوضوح لدى ماندلبروت. فكثير من كتبه مصوغة بلغة الأنا، وتكثر فيها عبارات مثل: «أزعمُ... لقد فهمتُ وطوّرتُ... ونفذتُ... وبرهنتُ... لقد أظهرتُ... صغتُ... وخلال رحلاتي في تلك الأرض العلمية التي اكتشفتها، أعطيتُ لنفسي الحق في إطلاق الأسماء على بعض ملامحها».

ولم يتقبل الكثيرون من العلماء هذا الأسلوب. ولم يخفف من تحفظاتهم ميل ماندلبروت للإقرار لغيره بالفضل بغزارة.

ولاحظ نقّاده أيضاً أن معظم من يستشهد بهم ليُقرّ بأفضالهم، كانوا أمواتاً. ولاحظوا أن تلك مناورة بارعة هدفها الحصول على المزيد من السلطة المعنوية. وعمد بعضهم إلى مقارعته. لقد صار من الصعب تجنّب استعمال مصطلح فراكتال، لكنهم استبدلوه أحياناً

بمصطلح «أبعاد هوسدورف ـ بيزوكوفيتش» عند الحديث عن الأبعاد الفراكتالية. وجهر الكثيرون من علماء الرياضيات بأن تسرّعه في طرح البداهات والخلاصات، ترك مهمة البرهان عليها للآخرين الذين يصبح لهم الحقّ في الحصول على التقدير المناسب عن أعمالهم! وبدا ذلك أمراً مشروعاً. فإذا زعم عالم ما أنه يعتقد بصوابية أحد الأمور، ولم يبرهن مقولته ثم ظهر من يعمل بدأب لإقامة البرهان عليها، فلأيهما يرجع التقدير حينئذ؟ وتفاقم الأمر مع دخول الكومبيوتر على الخط. فقد شرع علماء يستعملونه مثل المختبرات للبرهنة على قوانين مُعيّنة، من دون الدخول إلى حلقة العمل الدؤوب في إنشاء النظرية ثم البرهان عليها ثم استخلاص نظرية ثانية منها، ثم البرهنة عليها؛ وهكذا.

احتوى كتاب ماندلبروت على مسائل تتوزّع على حقول كثيرة، إضافة إلى حشوه بمعلومات موجزة عن تاريخ الرياضيات. وفي أي حقل عمل علماء الكايوس، باستطاعة ماندلبروت الزعم بأنه سبقهم إليه. ولم يهتم بالنقاد الذين لاحظوا أن مراجعه بدت غامضة أو من دون فائدة. وفي المقابل، ساد إجماع على قوة حدس ماندلبروت في التنبّه إلى الاتجاه الذي تتقدم فيه علوم لم يدرسها جيداً، بدءاً من علم الزلازل ووصولاً إلى علم وظائف الأعضاء. وضاق حتى معجبوه ذرعاً بذلك المزيج من التنوّع والحدس اللذين يعطيانه الحق في الزعم بأنه سبق الجميع إلى اكتشاف أفكارهم.

ولم تُعق تلك الأمور ماندلبروت الذي آمن بأن عليه أن يتلاعب كثيراً لكي يُمرّر ما يريد. لقد صاغ أفكاره الأولى بحذر، حتى لا تؤذي أحداً. وتعيّن عليه حذف الكثير من مطالع مقالاته، التي تحتوي رؤاه اللامعة والمتطرفة، لكي يضمن نشرها. وعندما كتب النسخة الأولى من كتابه، الذي نُشر في فرنسا عام ١٩٧٥، شعر بضرورة أن يتظاهر بعدم احتواء المؤلَّف على أفكار مُدهشة.

ولذلك، وصف الكتاب عينه، عند إعادة صوغه للمرة الأخيرة، بأنه: «مرجع ومانيفستو ثوري». لقد تعامل ماندلبروت ببراعة مع السياسة العلمية. ووصف ذلك بالقول: «أثّرت السياسة على أسلوبي بطريقة أسفت لها لاحقاً. عندما كنت أصف شيئاً ما بأنه «طبيعي...

ثمة ملاحظة مثيرة»، فإن تلك الأوصاف تناولت أشياء ليست طبيعية، ولم تكن الملاحظة المثيرة سوى نتيجة لجهد طويل من التقصي والبحث عن البراهين ونقدها. لقد فعلت ذلك لكي يبدو الكتاب مقبولاً.

فحينذاك، كانت السياسة العلمية تقول إن وصف شيء ما بأنه يمثّل قطيعة مع السائد، يؤدي إلى إهمال تام له... وقد عملت على تجنّب تلك المُداورة في الأوصاف لاحقاً».

وبنظرة استرجاعية، يمكن القول إن ماندلبروت لاحظ بحزن أن أفكاره من شأنها إثارة ردود فعل متنوعة، وخصوصاً من علماء الرياضيات. وعلى رأس القائمة، يأتي الرفض على شكل أسئلة من نوع: «من أنت لتقول هذا الشيء بالنسبة للعلوم التي نعمل نحن في مجالها؟»

وفي مرحلة ثانية، يأتي الرفض عبر السؤال عن العلاقة بين ما يطرحه ماندلبروت وبين العلوم التي ينتقدها. وفي تنويع آخر، يسأل البعض عن علاقة الرياضيات التي يدعو إليها ماندلبروت بالرياضيات المُقرّة أكاديمياً، ولماذا لم يتوصل علماء آخرون إليها.

تختلف الرياضيات عن الفيزياء وغيرها من العلوم التطبيقية، بالنسبة إلى مسألة النظريات. ففي الفيزياء، عندما يصبح فرع ما قديماً، فإنه يُنسى، أو يغدو جزءاً من التاريخ، أو يُلهم بعض العلماء؛ لكنه يُعامل كشيء ميت. ويبدو الأمر على عكس ذلك في الرياضيات، التي تمتلئ بالقنوات والطُّرق المختصرة التي قد لا تقود إلى أي شيء في مرحلة ما، لكنها قد تُهيمن على الدارسين في مرحلة ثانية. ويصعب التنبؤ بالإمكانات التي تتضمنها الأفكار المُجردة، ولا بالكيفية التي تقفز فيها فجأة لتُصبح أمراً مثيراً. لذا، ينظر عالم الرياضيات إلى الإنجازات بطريقة جمالية، ويعطون تقديراً عالياً لأناقتها وجاذبيتها.

ولذا، أدّى ميل ماندلبروت للاهتمام بتاريخ علم الرياضيات، إلى عثوره على الكثير من الأفكار القيّمة القديمة وشبه المنسية. وأثار ذلك الأمر عينه اعتراضاً من نوع: «لماذا لم يتنبّه المتخصصون في تلك الفروع من الرياضيات بتلك النظريات، ما دامت أمام عيونهم معظم الوقت؟».

وفي النهاية، صار مصطلح فراكتال (التكرار المتغيّر) وصفاً لطريقة للتفكير في تلك الأشكال غير المنتظمة والمتكسرة والمتحطمة التي تمتد بين ندف الثلج والغبار الكوني في المجرات.

يشير المنحنى الفراكتال إلى تركيب مُنتظم «مُخبّأ» بين فوضى أشكال فائقة التعقيد. وراهناً، يفهم طلبة المراحل الثانوية الأشكال الفراكتال ويتلاعبون بها. وترسم الكومبيوترات الشائعة أشكالاً على شاشاتها، بواسطة برامج صغيرة وسهلة ومتداولة بين عشّاق الكومبيوتر.

لاقت أفكار ماندلبروت قبولاً حماسياً لدى اختصاصيي النفط والجيولوجيا والمعادن، وخصوصاً ممن يعملون في مراكز البحوث في الشركات الضخمة. ففي منتصف الثمانينات من القرن العشرين، عمل على الفراكتال عدد ضخم من علماء شركة «إكسون» للنفط. وفي شركة «جنرال إلكتريك»، احتلت هندسة التكرار المُتغيّر مكانة مركزية في العمل على اللدائن، وكذلك، وعلى نحو فائق السريّة، بالنسبة لأمن المفاعلات الذرية. وفي هوليوود، وجدت هندسة الفراكتال تطبيقاتها الأضخم والأكثر مشهدية وشيوعاً، في صناعة المؤثرات الخاصة في الأفلام، فمكّنت من التلاعب بالمناظر والأشكال والوجوه من كل نوع وصنف.

إن الأنماط التي اكتشفها روبرت ماي وجايمس يورك وغيرهما في مطلع السبعينات من القرن العشرين؛ بما تمثّله من تقاطع بين العشوائي والمنظّم، قد حازت انتظاماً لا يمكن وصفه إلا باستعمال العلاقة بين المقاييس الكبرى والصغرى. وكذلك تبيّن أن التراكيب التي تشرح الديناميات اللاخطيّة، تنتمي إلى هندسة الفراكتال، التي ولّدت مجموعة من القوانين عمل عليها علماء الفيزياء والكيمياء والزلازل واللدائن والفيزيولوجيا، إضافة إلى اختصاصيي نظرية الاحتمالات. واقتنع ذلك الجمع الهائل من العلماء بأن هندسة التكرار المُتغيّر إنما تمثّل هندسة الطبيعة نفسها.

وبذا، ولّدوا قوة دفع ضربت في عمق الرياضيات التقليدية والفيزياء أيضاً. والمفارقة

أن هذين الحقلين لم يُعطيا ماندلبروت احترامه الكامل. ولا يعني ذلك أنهما تجاهلاه. وللمثال، أخبر عالم في الرياضيات أصدقاءه أنه استيقظ مذعوراً من كابوس رأى نفسه في يوم الدينونة، مع صوت عميق يذكّره بأن ماندلبروت لم يكن مخطئاً كلياً!

يضرب مفهوم الشَبَه مع الذات (التكرار) عصباً ثقافياً قديماً. فقد تخيّل لايبتز أن قطرة الماء تحتوي على نسق الكون كله، لأنها تحتوي على مجموعة من نقاط الماء التي تحتوي كل منها على نقاط أخرى وهكذا. وكتب وليام بلايك: «يمكن رؤية العالم في حبة رمل». وكثيراً ما مال العلماء للتفكير بهذه الطريقة.

فعندما اكتشفت الحَوْينات المنوية، ساد الاعتقاد علمياً بأن كلاً منها يمثّل كائناً كاملاً وصغيراً. ومع التقدم العلمي، اختفى مفهوم الشَبَه مع الذات، ولأسباب وجيهة. فمع الميكروسكوب، تبيّن أن الحويْن المنوي ليس إنساناً مُصغّراً. وفهم العلماء أن عملية التكاثر أعمق من مجرد التكرار. إن الحس العلمي بالتكرار في العالم، جاء قديماً بسبب محدودية التجربة الانسانية، فلم يُفهم الكون الواسع إلا باعتباره تكراراً للأرض التي يحيا البشر عليها.

مع الميكروسكوب والتيليسكوب، تلاشى مفهوم التكرار المتشابه. ونبّهت الاكتشافات العلمية إلى أن تغيير المقاييس، مثل الانتقال إلى المقياس الكبير للكون أو الصغير للخلية والذرّة، يترافق مع تغييرات كبرى في الظواهر وسلوكها. فمع استعمال الفيزياء لمُسرّع الجزيئيات، تبدّلت نظرة العلم للجسيمات الصغيرة وطاقتها، ما أثبت أن سلوك المادة يتبدّل بشدّة مع اختلاف المقياس.

وعلى السطح، يبدو القول بتناسب الظواهر عبر مقاييس مختلفة، وكأنه يقلّص المعلومات التي يمكن الحصول عليها من المراقبة العلمية عبر تبدّل المقاييس. ويرجع ذلك من ذلك الإحساس، ولو جزئياً، بالنظر إلى الاختزالية التي سادت العلم، خصوصاً مع التفرّع في التخصّصات، والميل إلى التركيز على مراقبة ظواهر بشكل أكثر تحديداً، وبالتالي أكثر ضيقاً. وعلى ذلك المستوى، فإن الظواهر ليست خالية من التعقيد الكبير.

ومع الكايوس، ظهرت فكرة تقول إن التعقيد الفعلي (والهائل المدى) يظهر مع الانتقال من الصورة التفصيلية إلى المشهد الكبير؛ وبقول آخر، إن التعقيد في الظاهرة يظهر عبر المقاييس.

ولم تكن تلك الفكرة من ابتكار ماندلبروت، على الرغم من مساهمته الكبيرة فيها. وأطلت تلك الفكرة برأسها في ستينات القرن العشرين، لتصبح فكرة أساسية في سبعيناته، بحيث عبّرت عن نفسها ثقافياً في ميادين كثيرة.

إن مفهوم الشَبَه مع الذات مُتضمّن أيضاً في أعمال لورنز عن الطقس. وشكلت جزءاً من حدسه تجاه التراكيب الصغيرة في خرائط المناخ التي صنعتها مُعادلات للمُحاكاة الإلكترونية للطقس وأحواله. ولم تظهر بوضوح لعينيه في العام ١٩٦٣، لأن كومبيوتره لم يكن مُتطوّراً بدرجة كفيّة. واندرجت فكرة التناسب عبر المقاييس في فيزياء الكايوس، بصورة أكثر وضوحاً مما ورد في أعمال ماندلبروت نفسه. وبعيداً من علمَيّ الرياضيات والفيزياء المتقاربين، ظهرت فكرة إمكان رصد الظواهر عبر المقاييس وتناسبها في ميادين مثل البيولوجيا التطورية. وبات البيولوجيون مقتنعين في إمكان رصد أنماط تطور الجينات في الكائن الفرد والنوع وعائلات الأنواع (الفصائل البيولوجية) في آن واحد.

والمفارقة أن تجدد النظرة إلى تناسب الظاهرة عبر المقاييس المختلفة، جاء لسبب مُشابه لما أدى إلى موت الفكرة المُبسّطة (والساذجة) عن الشَبَه مع الذات سابقاً! فعند اختتام القرن العشرين، باتت الصور الفائقة الصِغَر والفائقة الكِبَر جزءاً من التجربة اليومية لأعداد متزايدة من البشر. وتعاطت الحضارة الانسانية بكثافة، بصورة لم تحدث في تاريخها، مع صور المجرات والذرّات. لم يعد مطلوباً التخيّل، كما دعا لايبتز سابقاً، للتوصل إلى صورة من نوع «العالم في قطرة ماء». وصارت الصور الآتية من التلسكوب والميكروسكوب جزءاً مما يراه الناس يومياً. وبذا، تحفّزت الأدمغة لتفحص العلاقة بين هذين النوعين من الصور، وهذا ما أوصل بعضهم إلى استنتاجات عملانية في شأنها.

وأحس الكثيرون من علماء الرياضيات الميّالين إلى هندسة التكرار المُتغيّر (فراكتال)،

بتشابهها مع التغيّرات التي هزّت الفنون في النصف الثاني من القرن العشرين. وبالنسبة إلى ماندلبروت، فإن التجسيد الأقوى للهندسة الاقليدية يظهر في مدرسة الرسم المعروفة باسم «بوهوس» المفتونة بالأشكال الهندسية المُنظّمة والبسيطة مثل المُكعّب والمربع والدائرة وغيرها.

فلقرونٍ طويلة، اقترنت كلمة هندسة نفسها مع الأشكال المنُظّمة، فسُميت المباني بالهندسية لأنها تتألف من أشكال بسيطة وخطوط مستقيمة ودوائر، ومن الممكن وصفها باستعمال أعداد مبسّطة. وسرعان ما سار الميل الهندسي، بهذا المعنى، إلى الذوبان في الفن المعماري. ولم يعد مهندسو نيويورك يكترثون باستنساخ ناطحة السحاب «سيغرام»، بعد أن كرروها ما لا يُحصى من المرات. وبدا سبب هذا التغيّر في الثقافة والفن واضحاً، بالنسبة لماندلبروت وأنصاره. إن الأشكال المُبسّطة ليست إنسانية.

وكذلك تفشل في التوافق مع الطريقة التي تُنظّم بها الطبيعة نفسها، ومع نظرة الإنسان المُعاصر إلى العالم. وبحسب رأي الفيزيائي الألماني غيرت إيلنبرغر: «لماذا تبدو صورة أوراق شجرة تلاعبها العاصفة جميلة، فيما لا تبدو صورة المباني الجامعية رتيبة، على الرغم من الجهد المعماري المبذول في بنائها؟ بالنسبة إليّ، يرجع ذلك نسبياً إلى الذائقة الجديدة في النظر إلى النُظُم الديناميكية. يستوحي الإحساس البشري بالجمال كثيراً من التتابع المنسجم للأشياء المنتظمة وغير المنتظمة، كالحال في الطبيعة وأشيائها، مثل الغيوم والأشجار وهضاب الجبال وبلورات الثلج. تُعطي أشكال تلك الأشياء الطبيعية انطباعاً باستبطانها عمليات ديناميكية، وباحتوائها توليفات مُعيّنة من الانتظام واللاانتظام».

تملك الأشكال الهندسية مقياساً مُحدّداً يتناسب مع حجمها. وبالنسبة لماندلبروت، ينسجم الفن مع غياب المقياس بمعنى احتوائه على عناصر تبقى مهمّة عبر مقاييس مختلفة. وعلى عكس ذائقة ناطحة سحاب «سيغرام» (حيث يسود النظام المُعتمد على

المقياس)، ظهرت في باريس حركة «الفنون الجميلة» في النحت، وخصوصاً في نحت النتوءات الموصوفة بـ«البشعة» التي تزين المباني. وكذلك ظهرت في استعمال الحجارة المُتعرجة السطح في الزينة، في الميل إلى الدانتيال في حوافي الملابس، في الميل إلى استعمال الجنازير، في اللوحات التي تبدو وكأنها غير منجزة، وفي تزيين الجسور بالمنحوتات غير المنتظمة والملتوية والملتفة.

يمكن اعتبار مبنى دار الأوبرا في باريس نموذجاً من هذه الذائقة الجديدة في الفن، والذي تظهر جمالياته عبر مقاييس مختلفة. ويُظهر ملامح من الجمال، من كل بُعد يُنظر إليه. لم يعد الجمال حكراً على المقياس، لأنه بات يتضمن المقاييس كلها. ثمة فرق هائل بين تقدير الانسجام في بنية المعمار، وبين الإعجاب بتوحّش الطبيعة. وبالنسبة للقيم الجمالية، جعلت هندسة التكرار المُتغيّر العلم متناغماً مع ذائقة حديثة تميل للمنفلت والبريّ وغير المُدجّن. وصارت غابات المطر والصحارى والأدغال والأرض المهجورة، تعبيراً عما يريد المجتمع التعامل معه. وبحسب كلمات جون فاولز عن بريطانيا في القرن الثامن عشر: «لم تبد تلك الحقبة ميلاً للطبيعة البكر وغير المنتظمة. واعتبرتها شيئاً وحشياً وعدوانياً وبشعاً، كأنها تذكار من زمن الخروج من الجنة... وحتى العلوم الطبيعية، لم تتآلف مع الطبيعة الخام، واعتبرتها نموذجاً لما يتعيّن إخضاعه وتدجينه وتصنيفه وترتيبه واستعماله».

عند ختام القرن العشرين، تغيّرت الثقافة، فتغيّر العلم معها. وبذا استطاع العلم، أخيراً، أن يجد فائدة ما في مجموعة كانتور ومنحنى كوخ. فإلى وقت طويل، خدمت تلك الأشكال للإشارة إلى الطلاق بين الفيزياء والرياضيات، وهو حدث في مطلع القرن العشرين مُنهياً زواجاً دام منذ زمن إسحاق نيوتن. واعتبر كانتور وكوخ أن الرياضيات التي استنبطاها ربّما كانت أكثر حذقاً من الطبيعة. ثم تبيّن لاحقاً أنها بصعوبة أمسكت بطرف الخيط في مجاراة التعقيد الهائل للطبيعة. وهكذا، انطلقت حركة لإعادة التقارب بين الفيزياء والرياضيات. وصنع ستيفن سمييل جسراً بين الرياضيات والنُظُم الديناميكية

في الفيزياء. وعند ختام القرن العشرين، تغيّرت العلاقة بين الفيزياء والرياضيات جذرياً عما كانته قبل سبعين سنة.

وعلى الرغم من جهود ماندلبروت وسمييل، وكلاهما من علماء الرياضيات، فإن نظرية الكايوس تبلورت فعلياً على يد علماء الفيزياء. لقد صنع ماندلبروت لغة ضرورية للكايوس، إضافة إلى تصورات مُذهلة عن الطبيعة. ولكنه أقرّ بأن أدواته تفيد في وصف الطبيعة، أكثر من تفسيرها. واستطاع أن يستنبط قائمة بالعناصر الطبيعية التي تتضمن أبعاداً تكرارية مُتغيّرة، مثل الشواطئ وشبكات الأنهار والغابات والمجرات. واستطاع العلماء استخدام أرقام ماندلبروت للتوصّل إلى بعض التنبؤات بخصوص عدد من الظواهر الطبيعية. ولكن الفيزيائيين رغبوا في معرفة المزيد والمزيد. وأرادوا الوصول إلى الأسباب. كما عثروا على أشكال في الطبيعة لم تكن متوقَّعة. لم تكن تلك الأشكال مما يُرى بالعين، بل أشكالاً من الحركة.

الجواذب الغريبة

«للدّوامات الكبيرة دوّامات صغيرة تعطيها سرعتها ،
وللدّوامات الصغيرة دوّامات أصغر وهكذا دواليك ،
إلى أن تصل الأشياء إلى حدّ اللزوجة» .

لويس ريتشاردسون

يرجع التفكير علمياً بالاضطراب إلى زمن بعيد. وفكر فيه الفيزيائيون العظام كلهم، بطريقة مُعلنة أو مضمرة. يتفرّع الفيض السلس إلى دوّامات وتيارات. وتهزّ الأنماط المتوحشة الحدود بين حالتيّ السيولة والصلابة. وتستنفد الطاقة بسرعة من الحركات الكبيرة إلى الصغيرة. فلماذا؟ جاءت الأفكار الكبيرة عن الاضطراب من الرياضيات؛ أما الفيزيائيون فقد نظروا إليه دوماً كمضيعة للوقت، إذ بدا لهم غير قابل للفهم. ثمة قصة شائعة عن وورنر هايزنبرغ (وهو من مؤسسي نظرية الفيزياء الكمومية «الكوانتوم») تقول إنه أسرّ للذين أحاطوا بسرير موته باعتقاده أن ما بعد الموت قد يُجيب عن أحد سؤالين أرّقاه طويلاً (النسبية)، لكنه ليس متيقّناً من العثور على إجابة عن الثاني: لماذا يجب على الطبيعة أن تتضمن الاضطراب أصلاً؟

لقد وصلت الفيزياء النظرية إلى نوع من الجمود بخصوص تلك الظاهرة، فكأن العلم رسم خطاً يفصله عن الاضطراب فلا يضع قدمه بعده إطلاقاً. أما قبل ذلك الخط، فإن السوائل تسير بطرق منتظمة يمكن فهمها. ولا يتصرف السائل المنتظم باعتباره يضم عدداً لا متناهياً من الجزيئات المستقلة، تستطيع كل منها أن تتحرك باستقلالية. وعوضاً عن ذلك، تتحرك أقسام من السوائل بشكل متراصف بعضها فوق بعض، فتظل كذلك وكأنها أحصنة في استعراض خيّالة. واستنبط المهندسون طُرُقاً عملية لاحتساب سريان تلك السوائل، استقوا معظمها من فيزياء القرن التاسع عشر التي اهتمت بشأني السوائل والغازات بصورة كبيرة. واعتبرت تلك الظواهر منتظمة، فدُرست قبل وصولها إلى خط الاضطراب. ومع القرن العشرين، تغيّر هذا المشهد قليلاً. وبالنسبة للضليعين في الفيزياء النظرية، احتفظت ديناميكا السوائل بسرٍ ما، لكن ليس من العملي التطرق له. وساد

إحساس علمي بأن الجوانب العملية من تلك الحركة مفهومة تماماً، وبذا لم تعد فيزياء السوائل تؤرق الفيزيائيين. واختزلت إلى شؤون تقنية تهمّ المهندسين والتقنيين. ولذا، ألحقت فيزياء السوائل بكليات الهندسة. وتقلّص التفكير في الاضطراب إلى محض الاهتمام بإزالته.

وفي بعض التطبيقات، قُبِلَ الاضطراب لأسباب عملية محض. ففي محركات الطائرات، مثلاً، تعتمد كفاية احتراق الوقود في المحركات على سرعة المزج، التي يُعززها الاضطراب. وكثيراً ما تساوى الاضطراب مع الكارثة. فمثلاً، يؤدي اضطراب انزلاق الرياح على جناح الطائرة إلى تبدد قدرتها على رفع هيكلها. ويعوّق الاضطراب في أنابيب البترول سهولة الضخّ فيها. تنفق الحكومات والشركات الكبرى أموالاً هائلة للبحوث عن الطائرات والغواصات والمحركات التوربينية والدافعات والمروحيات وغيرها مما يتحرك في وسط سيّال، مع ملاحظة التشابه بنيوياً بين الماء والهواء والموجات المتولدة عن الانفجارات الذرية. ويهتم الاختصاصيون كثيراً بتدفق الدم في الشرايين وعبر صمامات القلب. وينشغلون بالانفجارات وتشكيلاتها، وأيضاً بالدوّامات والتيارات البحرية واللهيب وموجات الصدم. ومن الناحية النظرية، مثّلت القنبلة الذرية مشكلة بالنسبة للفيزياء النووية في الحرب العالمية الثانية، ذلك أن الفريق الذي تولّى شأنها في مختبر «لوس آلموس» شُغل بمسائل متصلة بديناميكا السوائل.

إذاً، ما هو الاضطراب؟ إنه «خربطة» من اللاانتظام تمتد عبر المقاييس كلها، من الدوّامات البحرية الصغيرة إلى التيارات الجارفة. إنه ما لا يستقر. وهو قابل للتبدُّد، بمعنى أنه يستنفد الطاقة ويولّد دفعاً. إنه حركة اتجهت صوب العشوائية. لكن، كيف ينتج ذلك الاضطراب من السريان الهادئ؟ لنتصور تياراً يتدفق من صنبور فائق النعومة، ويأتي ماؤه من مصدر ثابت بعيد من الاهتزاز، كيف بإمكان شيء بهذا القدر من الانتظام أن يولّد اضطراباً عشوائياً؟

وفي صورة الاضطراب، تبدو القوانين كلها وكأنها تبدّدت. وعقب ظهوره، فإنه

يتعاظم على نحو كارثيّ. ولذا، صار الانتقال من الانتظام إلى الاضطراب سراً مُعضلاً بالنسبة للعلم. كيف يتحوّل تيار هادئ تحت صخرة إلى دوّامة بحرية، تنمو وتنقسم وتخلق تياراً يجرّ السطح إلى الأسفل؟ يتصاعد دخان السيجارة من المنفضة، فتتزايد سرعته إلى حدّ مُعيّن ثم ينقسم إلى دوّامات صغيرة. من المستطاع مختبرياً مراقبة لحظة ظهور الاضطراب؛ كما يمكن اختباره على جناح طائرة أو دفاش مروحية في نفق هواء اختباري؛ لكن طبيعته تظل مراوغة.

وتقليدياً، تراكمت بعض المعارف عن الاضطراب، لكنها مثّلت حالات خاصة وليست معرفة شاملة. إن البحوث، التي تُجرى بطريقة تجريبية محضة، عن اضطراب الهواء على جناح طائرة «بوينغ-٧٠٧»، مثلاً، لا تُساعد في تقدّم البحوث المماثلة على جناح الطائرة المقاتلة «أف-١٦». وتبدو الكومبيوترات الخارقة شبه عاجزة أمام حركة اضطراب السوائل.

إذا رُجَّ سائل ما، يُثار. ولأن السائل له لزوجة معينة، فإنه يستنفد الطاقة، بحيث أن التوقّف عن رجّه يؤدي إلى سكونه. عندما ترجّ سائلاً ما، فأنت تُضيف إليه طاقة ذات تردد خفيض، أي أن موجاتها طويلة. وأول ما يحدث هو تكسّر الموجات الطويلة إلى موجات قصيرة. تظهر دوّامات تحتوي على دوّامات أصغر منها؛ وكُلاً يبدّد الطاقة، وكُلاً يدخل في إيقاع خاص به.

في ثلاثينات القرن العشرين، صاغ أناتولي كولموغوروف تصوراً رياضياً أولياً عن الدوّامات. واستطاع تتبع مسار الطاقة عبر مقاييس مختلفة وصولاً إلى الحدّ الذي تُصبح فيه الدوّامات فائقة الصغر بحيث تتغلب عليها قوة اللزوجة.

ولكي يجعل وصفه واضحاً، افترض كولموغوروف أن الدوّامة تملأ الحيز الذي تحتله في السائل، الذي يبقى منسجماً في مجموعه. ولم تثبت صحة هذا الافتراض. وقبل ذلك بأربعة عقود، لاحظ أنطوان بوانكاريه، عدم دقة افتراض الانسجام في السائل، عندما راقب الدوّامات في الأنهر والكيفية التي تختلط فيها مع بقية السائل. إن التدويم موضعي،

والطاقة تتبدد في جزء من الحيِّز الكلي للسائل. وعند التمعّن في حركة التدويم عبر مقاييس مختلفة، تظهر دوماً مناطق من الهدوء متشابكة مع مناطق الحركة. إذاً، يجب استبدال مفهوم الانسجام بمفهوم التقطّع. وتنتمي صورة الانقطاع إلى هندسة التكرار المُتغيّر (فراكتال) بحيث تتشابك مناطق النعومة والفوران عبر المقاييس كلها. وتعجز حتى هذه الصورة الفوّارة عن وصف حركة التدويم.

ويشبه ذلك إلى حدّ ما، مسألة وصف لحظة اندلاع الاضطراب. كيف يعبر سائل ما الحدود بين الجريان السلس والاضطراب؟ ما هي المراحل التي يمرّ بها قبل اكتمال حركة الاضطراب؟ وللإجابة عن تلك الأسئلة، ظهرت نظرية أكثر قوة. وصيغ منهجها على يد عالم الفيزياء الروسي ليف لانداو، الذي ما زال كتابه عن ديناميكا السوائل مرجعاً معتمداً عالمياً. وتتألف الصورة التي رسمها لانداو للتدويم من مجموعة من الايقاعات المتنافسة. وارتكز على مقولة إنه كلما زادت كمية الطاقة التي تدخل إلى نظام التدويم، ظهرت تردّدات جديدة بحيث ينطلق كلٌّ منها في لحظة مختلفة عن الثانية، ويصبح غير متناغم مع ما سبقه. ويشبه الأمر كمنجة يعزف عليها بأكثر من قوس، وكل يضرب بقوة مغايرة للآخر، وكل يبدأ في لحظة مغايرة للآخر، مما يولّد أنغاماً مُشوَّشة ومُضطربة.

والمعلوم أن السائل أو الغاز يتألف من مجموعة من النُّثر التي قد تكون لا متناهية عددياً. وإذا تحركت كل نثرة في شكل مستقل، تُصبح احتمالات الحركة في السائل لا متناهية، أو ما يسمى علمياً «درجات متفاوتة من الحرية». وبذا، يتعيّن على المُعادلات التي تصف تلك الحركة أن تتعامل مع مُتغيّرات لا متناهية أيضاً. والحق أن النُّثر لا تتحرك باستقلالية كلياً، بل تعتمد حركة كل نثرة على ما يجاورها. وفي حال التدفق المنتظم، تصبح «درجات الحرية» محدودة عددياً. وتبقى حركات النُّثر، رغم تعقيداتها، مترابطة. وتبقى النثر المقترب بعضها من بعض على تلك الحال، أو تتفرق بسلاسة، وبطريقة خطيّة. ويُشبه ذلك ما يُنتج اختبارياً في أنفاق الريح. وللحظة، يرتفع عمود دخان السيجارة بصورة متماسكة.

ثم يحلّ التشوش عبر حراك وحشيّ الطابع. وأحياناً، يوصف الحرّاك بمصطلحات من نوع التذبذب، التشرشر (زيك ـ زاك)، الأنشوطة، الدوالي المنحرفة، والتداخل المتشابك. واعتقد لانداو بأن هذه الحركات يتراكب بعضها فوق بعض، مما يخلق إيقاعات بسرعات وأحجام متداخلة. ونظرياً، تبدو تلك الصورة منسجمة مع الوقائع. وفي المقابل، وُصفت معادلات لانداو الرياضية بأنها عديمة الجدوى. لقد حفظ منهج لانداو ماء وجه العلم، لكنه بدا مستسلماً أمام تعقيد التدويم.

تعبر المياه أنبوباً أو تدور على جدران أسطوانة، فتُصدر هسيساً خافتاً. ومن المستطاع تخيّل الوضع عينه، مع التلاعب في الصنبور الذي يتدفق الماء منه. وتدريجاً، تظهر موجة تضرب جدار الأنبوب. مع الدفقة الثانية، تظهر موجة ثانية بتردد مختلف، فلا تتساوق مع سابقتها. وتتداخل إيقاعاتهما المختلفة، وتتنافس وتتضارب. وتضرب الموجتان جدران الأنبوب، فتتخالطان بتنافر. ثم تُرسل دفقة ثالثة. تظهر موجة ثالثة، بتردد ثالث. ثم رابعة، وخامسة وسادسة؛ وكلها غير منسجمة في ما بينها. لقد غدا سريان السائل شديد التعقيد. إنه الاضطراب. لقد تقبّل الفيزيائيون تلك الصورة.

وفي المقابل، لم يملكوا أدنى فكرة عن كيفية توقّع مستوى الطاقة الذي تحدث عنده «طفرة» بحيث يظهر تردد جديد. وجهلوا أيضاً طرق توقّع الترددات المستجدة. ولم ير أحد تلك الترددات مختبرياً، لأن أحداً لم يختبر نظرية لانداو عن الاضطراب.

يُجري المتخصصون في النظريات العلمية البحتة الاختبارات في أدمغتهم. وعلى عكسهم، يصنع التجريبيون الاختبارات بأيديهم. يفكر المُنظّرون، في ما يعمل التجريبيون. لا يحتاج المُنظّر إلى مُساعد؛ بينما يتوجب على العالِم الضالع بالتجارب أن يتعامل مع المساعد والطالب المُتدرّب واختصاصيي الأدوات. يعمل المُنظر في فضاء بكر، خالٍ من الضوضاء والاهتزاز والأوساخ، في حين تُنسج علاقة حميمة بين التجريبي والمادة، كتلك التي تنشأ بين النحّات والتمثال. يخترع المُنظّر شخوصه، كمثل تخيّل

عاشق مُولّه لمعشوقته المثالية. وينخرط التجريبي في مغازلة الحبيبة وإثارتها والشكوى منها.

ويحتاج المُنظّر التجريبي، والعكس صحيح أيضاً. وأدّى ذلك إلى نشوء نوع من علاقة غير متكافئة بينها، حتى في بداية العلوم عندما اجتمع الاثنان في واحد. وعلى الرغم من أن أفضل التجارب تتضمن عنصراً نظرياً، إلا أن العكس ليس صحيحاً. وتدريجاً، بات للمُنظّر هالة ومكانة أعلى.

وفي فيزياء الطاقة العُليا، يذهب المجد كله للمُنظّر، ويُختزل دور التجريبي إلى التقني المتخصص الذي يُدير آلات مُعقّدة. وبعد عقود من الحرب العالمية الثانية، وإذ غدت الفيزياء دراسة مُعمّقة عن الجُسيمات الأساسية، صارت الاختبارات المتقدمة هي تلك التي تُجرى في المُسرّعات الذرية. وبذا، دخلت لغة العلم مُصطلحات تصف سلوك تلك الجُسيمات مثل التدويم والتماثل واللون والنكهة. وبالنسبة للعامة من المهتمين بالعلوم، كما هو الحال لكثير من العلماء، عَنَت الفيزياء درس الجُسيمات الذريّة. والحق أن دراسة تلك الجُسيمات تتطلب مختبرات تستعمل كميات هائلة من الطاقة. وتدريجاً، تنامت درجة تعقيد الآلات اللازمة لتجارب فيزياء الجُسيمات. وبذا، تغيّرت مختبرات الفيزياء كلياً. وازدحمت المختبرات بالأيدي المتخصِّصة، وصار عمل الفريق ضرورة علمية. وفي البحوث الأصيلة التي تُنشر في دورية «مراجعة رسائل الفيزياء»، تحتل قائمة المشاركين في التجارب ربع حجم الورقة التي تصفها!

وعلى عكس ذلك، مال بعض التجريبيين إلى العمل الفردي، أو مع معاون وحيد. وتعاملوا بأنفسهم مع مادة الاختبار.

وبينما فقد حقل مثل الديناميكا الهيدروليكية مكانته، فإن دراسة «فيزياء الحال الصلبة للمادة» اكتسب أهمية متزايدة. ووسّعت الأخيرة نطاقها بحيث تطلّب الأمر استخدام اسم آخر للاحاطة بها. وصارت تُدعى «فيزياء المادة الكثيفة».

وتتطلب آلات أقل تعقيداً من فيزياء الجُسيمات. وتتقلص فيها المسافة بين المُنظّر

والتجريبي، بحيث بات أولهما أقل ادعاء والثاني أقل تطلّباً. ومع ذلك، ظلّ منظاراهما مختلفين. إذ رأى المُنظّر أن نظيره التجريبي يحتاج إلى المزيد من المعلومات ليُصبح أكثر إقناعاً، وأن نتائج الاختبارات تحتاج إلى مزيد من التوسع لتشمل أرقامها طيفاً أوسع. وفي المقابل، مال عالم الفيزياء التجريبية هاري سويني للتسليم بانتقادات رفاقه من اختصاصيي الفيزياء النظرية، لكنه أوضح دوماً أن التجارب لا تصل إلى كمالها إلا إذا حصلت على معلومات خالية من التشوش.

اهتم سويني بالتجارب على «فيزياء المادة الكثيفة». ودلف إلى عالمها أثناء دراسته في جامعة «جونز هوبكنز». وحينذاك، سادت حماسة جارفة لفيزياء الجُسيمات، خصوصاً مع امتلاء الجامعة بالأساتذة المبرزين فيها. وفي المقابل، لاحظ سويني أن معظم أقرانه ميّالون إلى العمل في برمجة الكومبيوتر أو في بحوث الليزر، واستشار فيزيائياً مُخضرماً انخرط لتوّه في بحوث عن «فيزياء الحال الانتقالية للمادة»، أي عندما تنتقل من الحال الصلب إلى السائل، من معدن غير مُمغنط إلى الحال المغناطيسية، ومن موصل إلى موصل فائق. وسرعان ما صار لسويني مكان يُجري فيه اختباراته. وحصل على آلة لليزر وجهاز للتبريد وبعض الحبال. وركّب آلة لقياس الفارق في قدرة ثاني أوكسيد الكاربون على نقل الحرارة، عند نقطة تحوّله من سائل إلى غاز. فقد ساد الاعتقاد بأن ذلك الفرق ضئيل. واستطاع سويني أن يبرهن على أن الفرق يصل إلى ألف ضعف! وأثار اكتشافه الاهتمام بقدراته العلمية، إذ تمكن من معرفة ما جهله الآخرون في مختبر صغير وعادي التجهيز.

وأوصلته تلك التجارب عينها إلى رصد ما يحصل عند النقطة الحرجة التي تصبح عندها الغازات مُشعّة، أي أنها تُصدر أنواراً.

وسُمي ذلك الضوء «التلألؤ»، لأن أشعته تُعطي لوناً أبيض يُشبه ما يشع من الحجر الكريم المعروف باسم «أوبال». والكثير من الأشياء التي اهتمت بها نظرية الكايوس، تتضمّن «فيزياء الحال الانتقالية للمادة» ظواهر مُعقّدة يصعب التنبؤ بمتغيّراتها انطلاقاً من تفاصيلها الصغيرة. فعندما تُسخّن مادة صلبة، تدخل كميات كبيرة من الطاقة إلى بواطنها،

مما يجعل جزيئياتها في حال من الحركة. وتحاول الجزيئيات التخلص من قيودها، ما يُجبر المادة على التمدد. كلما زادت كمية الحرارة، يزداد التمدّد. وعندما تصل الحرارة والضغط إلى نقطة حرجة، تحدث تقلّبات مُفاجئة وغير مُتصلة ولاخطيّة. يشبه ذلك الاستمرار في شدّ حبل حتى يصل إلى حدّ الانقطاع. وبعد تلك النقطة الحرجة، تذوب البلّورات، وتتفرّق الجزيئيات بعضها عن بعض. وتنطبق على هذه الحال قوانين السوائل، وهو أمر لم يكن متوقعاً عندما كانت تلك المادة في الحال الصلبة. ولم يتغيّر مقدار الطاقة للذرة إلا بمقدار ضئيل، ومع ذلك فإن المادة انتقلت إلى حال مختلفة، كأن تغدو سائلاً أو مغناطيساً أو موصلاً فائقاً!

وأجرى غونتر إهلرز، من مختبرات «آي تي أند تي بيل» في نيوجرسي، تجارب على ما يُسمّى انتقال الهيليوم السائل إلى الحال الفائق السيولة. ولاحظ أن مع هبوط الحرارة، يتحوّل الهيليوم إلى سائل شبه سحري، إذ تنعدم فيه ظاهرياً اللزوجة والاحتكاك. واهتم آخرون بالتوصيل الفائق. وصبّ سويني اهتمامه على انتقال السائل إلى حال البُخار. وفي السبعينات، شرعت كوكبة من علماء الولايات المتحدة وفرنسا وايطاليا، في دراسة مسائل جديدة. وضمت قائمتها أسماء مثل سويني وإهلرز وبيار بيرجيه، وجيري غولوب ومارزو غيغليو. وبمثل ما يعرف ساعي البريد الطرق والمفارق والبيوت، بات هؤلاء على معرفة بالنقاط التي تتحوّل عندها أحوال المادة بصورة جذرية. لقد درسوا الحدود القصوى التي تقف عندها المادة، أثناء انتقالها من حال إلى حال.

مشت بحوث «فيزياء الحال الانتقالية للمادة» عبر سلسلة من التشبيهات. فنُظر إلى الانتقال للحال المغناطيسية على أنه شبيه بالانتقال من حال السائل إلى البخار. وشُبّه الانتقال من حال السيولة العادية إلى حال السيولة الفائقة بالانتقال من التوصيل العادي إلى التوصيل الفائق. وبحلول سبعينات القرن العشرين، حُلّ الكثير من المسائل في هذا الحقل. وظهر سؤال عن المدى الذي تستطيع هذه الفيزياء أن تبلغه؛ وعن التبدلات التي يمكن رصدها فيتبين لاحقاً أنها تُمثّل حالاً انتقالية.

لم تكن الفكرة القائلة بتطبيق تقنيات «فيزياء الحال الانتقالية للمادة» على تدفّق السوائل، لا أكثر الأفكار أصالة ولا أشدّها وضوحاً. فالحق أن معظم الرواد الأوائل لعلم ديناميكا السوائل (هيدروديناميكا)، مثل رينولدز ورايليه وأنصارهما في مطلع القرن العشرين، فكروا أن التجارب المضبوطة بدقة على السوائل تُعطي تغييراً في نوعية الحركة؛ وهذا ما يُسمى في الرياضيات تفرّعاً.

فعند تسخين سائل في مكعب مغلق، مثلاً، ينتقل السائل في أسفل المُكعب من السكون إلى الحركة. وبذا، مال الفيزيائيون مُبكراً للافتراض أن الصفات الفيزيائية لذلك التفرّع تُشبه التغيّرات التي تصفها «فيزياء الحال الانتقالية للمادة».

ولم تكن التجارب على تدفق السوائل واضحة نظرياً لأن تفرعاتها، وعلى عكس «فيزياء الحال الانتقالية للمادة»، لا تتضمن تغييراً في المادة بحد ذاتها. ولذا، عمد العلماء إلى إضافة عنصر آخر: الحركة. يتحوّل السائل الساكن إلى سائل متحرك. فلماذا يتعيّن أن تتشابه المُعادلات الرياضية لهذا التحوّل مع تلك التي تصف انتقال السائل إلى حال البخار؟

في العام ١٩٧٣، درّس سويني في «سيتي كوليدج» في نيويورك. وكذلك درّس الفيزيائي جيري غولوب، المتخرّج من هارفارد وذو الطباع الصبيانية، في جامعة «هافرفورد»، في مدينة هافرفورد قرب فيلادلفيا، والتي ذاع صيتها كمعقل للفنون الحرّة، فبدت مكاناً غير ملائم لأعمال الفيزياء. ولم يمل خريجوها للتخصص في أعمال المختبرات.

وعلى رغم ذلك، راق غولوب أن يُدرّس الفيزياء، كما شرع في تطوير مختبر تلك المادة ليُصبح مركزاً علمياً اشتُهر بنوعية تجاربه المتقدمة. وفي تلك السنة عينها، طلب غولوب إجازة أكاديمية لمدة فصل دراسي، وسافر إلى نيويورك ليعمل بالتعاون مع سويني. واتفق الرجلان على الشبه بين «فيزياء الحال الانتقالية للمادة» وحال عدم الاستقرار في السوائل. وقررا اختبار نظام تقليدي للسوائل المحصورة بين أسطوانتين





تدفق بين أسطوانتين دوّارتين: أعطى نسق تدفق الماء بين الأسطوانتين جيري غولوب وهاري سويني طريقة للتأمل في الاضطراب. فمع زيادة سرعة الدوران، مال التركيب إلى التعقيد.
في البداية، كوّن الماء نمطاً مميزاً من التدفق يُشبه أكواماً من الكعك الأميركي المُحلى. ثم شرع الكعك في التموّج. واستخدم العالمان الليزر لقياس سرعة السائل عند ظهور كل اضطراب مستجد.

رأسيتين. وجعلا إحداهما تدور داخل الأُخرى، فتجذب السائل حولها. كذلك تحصر التجربة حركة السوائل بين أسطحها، فلا تحتل حيّزاً. وولّدت الأسطوانتان حراكاً اشتهر باسم «تدفق كوويت ـ تايلور». فتقليدياً، تدور الأسطوانة الداخلية بسرعة داخل الأُخرى التي تُغلّفها بسكون.

ومع تسارع الدوران، يظهر عدم استقرار أول. إذ يُكوِّن السائل شكلاً أنيقاً يشبه كومة من دواليب السيارات مرصوصة بعضها فوق بعض. ثم تظهر حلقات متراصة من أشكال تُشبه الكعكة الأميركية المُحَلاة، حول الأسطوانة. إذا وُضعت قشّة في السائل، فإنها تدور من الشرق إلى الغرب، ومن الأعلى إلى الأسفل ومن الداخل إلى الخارج. لم يكن ذلك جديداً. فقد رصده جورج تايلور في العام ١٩٢٣.

ولدراسة «تدفّق كوويت»، صنع العالمان جهازاً صغيراً، يتألّف خارجه من أسطوانة زجاج بحجم علبة طويلة من رقائق البطاطا المقلية (تشيبس)، وطوله يُقارب ٤٠ سنتيمتراً وعرضه خمسة سنتيمترات.

وجعلوا في داخلها أسطوانة من الفولاذ، ما يترك قرابة سنتيمتر بينهما لمرور الماء. ووصف الفيزيائي فريمان دايسون، الذي رأى التجربة قبيل اكتمالها، ذلك الوضع بقوله: «كنت ترى هذين العالمين منكبين على حوض صغير فوق مكتب متواضع. لم يمتلكا مالاً، لكنهما أنجزا عملاً رائعاً شكّل بداية الرصد الكميّ لظاهرة الاضطراب».

فكّر كلاهما في إنجاز عمل علمي يحظى بالتقدير عليه، قبل أن يدخل حومة النسيان. فقد سعى غولوب وسويني لإثبات نظرية لانداو عن اندلاع الاضطراب. وأحبا تلك التجربة كفيزيائيين، لأنها تلائم مع الصورة العامة للحال الانتقالية للمادة. وسبق للانداو إرساء الأسس النظرية لدرس ذلك الانتقال بالاستناد إلى رؤيته التي تقوم على أن تلك الظاهرة يجب أن تخضع لقوانين عامة وشاملة، مع ظهور أنظمة تتغلب على الفروق المُولّدة للاضطراب. وعندما درس هاري سويني النقطة الحرجة في تحوّل ثاني أوكسيد الكاربون من الحال السائل إلى البُخار، فإنه كان مقتنعاً بصحة نظرية لانداو التي تُنبئ بأن

عمله ينطبق أيضاً على وصف انتقال الزينون من السائل إلى الغاز. فلم لا يكون الاضطراب تراكماً ثابتاً من الايقاعات المتصارعة في سائل مُتحرّك؟

وتجهّز سويني وغولوب للتغلب على التشوش في حركة السوائل عبر ترسانة من التقنيات المخبرية المستقاة من التجارب المتراكمة في «فيزياء الحال الانتقالية للمادة». ولذا، جهّزا مختبرهما بأساليب وأدوات قياس لم تتخيلها عقول اختصاصيي ديناميكا السوائل. فلسبر التيارات المتحركة، استخدما ضوء الليزر.

والمعلوم أن مروره في الماء يؤدي إلى تكسّره وانحرافه. ويمكن قياس الانحراف بتقنية تحمل اسم «دوبلر انترفيرومتري». ثم تُدخل المعلومات إلى الكومبيوتر الذي لم يكن مألوفاً رؤيته على مكتب مختبر صغير.

وتُنبئ نظرية لانداو بأن الترددات المستجدة تظهر، الواحدة تلو الأُخرى، مع زيادة التدفق. ويتذكر سويني أنه قرأ وصاحبه تلك المقولة. وقررا رصد الانتقال الذي يحدث عنده ظهور تردد جديد. وأخذا بالتلاعب بسرعة دوران الأسطوانة، صعوداً وهبوطاً، مع إبقاء عيونهما مفتوحة على الحالات الانتقالية. وعندما جمعا نتائج تجربتهما، واجه سويني وغولوب الحدود الاجتماعية للعلم، على التقاطع بين مجالي الفيزياء وديناميكا السوائل. امتلكت تلك الحدود مزايا حيوية. ابتدأ الأمر بسؤال عن الجهة، ضمن «المؤسسة الوطنية (الأميركية) للعلوم» التي يُفترض أن تُموّلهما. ففي ثمانينات القرن العشرين، بات مفهوماً أن تجربة «تدفق كوويت-تايلور» تنتمي للفيزياء. ولكن في العام ١٩٧٣، حين أُجريت تلك التجربة، بدت وكأنها تختص بديناميكا السوائل، ولا أهمية لها إلا بالنسبة إلى من يهتم بديناميكا السوائل، أي المُهندسين، خصوصاً أن النتائج الأولى التي خرجت بها تلك التجربة في مختبر جامعة «سيتي كوليدج» بدت صافية إلى حدّ يثير الريبة. ولم يصدّقها اختصاصيو ديناميكا السوائل، لأنهم لم يعتادوا الدقة التي تُمارس في تجارب «فيزياء الحال الانتقالية للمادة». وإضافة إلى ذلك، لم يكن هدف تلك التجربة

واضحاً لعلماء ديناميكا السوائل. وفي المرة التالية التي حاول سويني وغولوب الحصول على تمويل من «المؤسسة الوطنية (الأميركية) للعلوم»، رُفِض طلبهما. فقد شكك بعضهم في نتائجها، فيما أشار آخرون إلى أنها لا تقدم شيئاً جديداً للعلم.

لكن التجربة لم تتوقف، بسبب حماسة العالِمين. فبحسب رأي سويني: «لقد رأينا الانتقال... كان شيئاً عظيماً... أردنا التوصل إلى المزيد».

ومع التعمّق في التجربة، تكسّرت مقولات لانداو. لم تنجح التجربة في إثبات نظريته. ففي المرحلة التالية من الانتقال، قفز حراك السوائل إلى حال مشوّشة، بحيث لم تعد تظهر أي دورات ملحوظة. لم تستجد الترددات، ولم يحصل تراكم في التعقيد. لقد غدت فوضوية كلياً. وبعد شهور، ظهر شخص بلجيكي نحيل القوام على باب العالِمين.

اعتاد ديفيد ريّال القول إن الفيزيائيين يقسمون إلى قسمين، أولئك الذين كبروا وهم يلعبون بالراديو ويفككونه وينظرون إلى الألوان القانية للأنابيب المفرغة ويتخيّلون أشياء عن سريان الإلكترونات، وأولئك الذين تعودوا اللعب مع الكيمياء. واعتاد ريال نفسه اللعب مع الكيمياء، بل مع نوع خاص من الكيمياء يتألف من المتفجرات والسموم، من الأصناف التي يسهل الحصول عليها في بلجيكا. وُلد ريال في بلدة «غينت» عام ١٩٣٥، ابناً لمُدرب رياضة يعمل أيضاً مدرساً للغويات.

وشق طريقه في العلوم، لكنه بقي مُغرماً بالنواحي الخطيرة من الطبيعة ومفاجآتها المُخبّأة في الفطر السام والفوسفور والكبريت والفحم. وتخصّص في الفيزياء الرياضية. واستطاع تحقيق إنجازات كبرى في نظرية الفوضى (كايوس). وعام ١٩٧٠، انضم إلى «معهد الدراسات العلمية العليا» في فرنسا، الذي شيد على نسق «معهد الدراسات المتقدمة» في جامعة برنستون. ودرج على ترك عائلته وجامعته بصورة دورية، ليذهب منفرداً في رحلات استكشافية، ماشياً مع حقيبة ظهر، عبر المناطق الوعرة، في المكسيك أو إيسلندا. وعندما يصادف أقواماً لا يعرفهم، يُرحب بضيافتهم، التي قد لا تزيد على بضعة أكواز من الذُّرة، ويُحس بأنه قابل العالم كما كان في زمن غابر. ثم يعود إلى كليته

ليعاود نشاطه العلمي، وقد بدا أصغر سناً وأمضى عزماً. وحضر ندوات لستيفن سمييل عن خريطة «حدوة الحصان» والاحتمالات الفوضوية للنُّظُم الديناميكية. وكذلك فكر طويلاً في اضطراب السوائل، وفي الصورة الكلاسيكية التي ترسمها نظرية لانداو. وأحس بأن ثمة خيطاً يربط تلك الأفكار بعضها ببعض، على رغم تناقضاتها. ولم يملك خبرة في تدفق السوائل. ولم يثنه ذلك عن الاشتغال بها، كما لم تثن كثيرين من قبله.

ويصف ذلك بالقول: «إن غير المتخصصين يكتشفون طرقاً جديدة دوماً...لا توجد نظرية طبيعية عميقة عن الاضطراب... الأسئلة التي يمكن طرحها عن تلك الظاهرة لها طابع عمومي، ولذا فإنها في متناول غير الاختصاصيين». يتمثّل أحد أسباب استعصاء الاضطراب على الفهم علمياً، في أن المُعادلات التي تصفه هي معادلات التفاضل اللاخطيّة، التي لا تجد حلاً لها إلا استثنائياً. وعلى الرغم من ذلك، فقد توصل رييال إلى صوغ بديل تجريدي عن مُعادلات لانداو، باستخدام مصطلحات سمييل وكذلك صوره التي تعامل فضاء الحيز على أنه شيء مطواع قابل للثني والضغط والمطّ والطي مثل حدوة حصان. وكتب ورقة علمية بالمشاركة مع عالم الرياضيات الدانماركي فلوريس تاكنز، نُشرت في العام ١٩٧١. ويسودها أسلوب الرياضيات على طريقة الفيزيائيين. وحملت عنوان: «عن طبيعة الاضطراب». ورمى العالمان إلى إعطاء فكرة جديدة عن طريقة انبثاق الاضطراب. وبدل تراكم الترددات الذي يقود إلى حركات لا متناهية ومتراكبة، رسم رييال وتاكنز أنه يمكن الوصول إلى الاضطراب التام بواسطة ثلاث حركات مستقلة.

وبلغة الرياضيات، فإن بعضاً من منطقهما بدا غير واضح ومخطئاً ومُستعاراً، وظلّت الآراء بشأن تلك الورقة متضاربة طوال ١٥ عاماً! وفي المقابل، فإنها سجّلت فتحاً علمياً، بما احتوته من رؤية وخلاصات وتجديد في صورة الفيزياء. ولعل الأشد إغواءً فيها، تلك الصورة التي وصفها المؤلفان باسم «الجاذب الغريب». الحق أن ذلك المصطلح يحمل نغمة إغراء، من وجهة التحليل النفسي، كما قال رييال لاحقاً. وتحتل مكانة مرموقة في علم الكايوس بحيث إن مؤلّفَيْها تنازعا ضمنياً، شرف اختيار كلمات ذلك المصطلح. وبدا

أنهما لا يستطيعان تذكّر ظهور ذلك الاسم بطريقة دقيقة. ودأب كلاهما على نسبة الأمر إلى نفسه، كلٌ بطريقته.

اندمج مفهوم الجاذب الغريب مع فضاء الحال. ويُشكّل الأخير أحد أقوى ابتكارات علم الرياضيات الحديث، لأنه يُعطي طريقة لتحويل الأرقام إلى صور، مستفيداً من دقائق المعلومات عن تفاصيل النظام المؤلف من مُكوّنات مُتحركة، سواء أميكانيكية كانت أو سيّالة، ويصنع خريطة طريق متحركة لاحتمالاتها كلها.

وفي أوقات سابقة، تعامل الفيزيائيون مع نوعين بسيطين من «الجواذب»: النقاط الثابتة والدورات المُحدّدة، والتي تمثّل سلوكاً في نظام وصل إلى حال مستقرة أو بات يُكرّر نفسه على نحو مستمر.

وفي فضاء الحال، تتقلص المعرفة عن وضع نظام ديناميكي، في لحظة معينة، إلى نقطة. تمثّل تلك النقطة لحظة في النظام الديناميكي. وفي اللحظة التالية، يتغيّر النظام، ولو بشكل هيّن، فتتغير النقطة وتتحرك. ويمكن رسم تاريخ النظام زمنياً بتتبع الشكل الذي ترسمه النقطة، وبتتبع مدارها، مع مرور الوقت.

كيف يمكن لمعلومات عن نظام مُعقّد أن تُختزل بنقطة؟ إذا امتلك النظام متغيّرين، يصبح الجواب سهلاً. ويأتي رأساً من الهندسة الديكارتية التي تُدرّس في المدارس: مُتغيّر على المحور الأفقي وآخر على المحور العمودي. إذا تشكل النظام من شيء متأرجح، مثل «رقّاص الساعة» الذي يتحرك في فراغ من دون احتكاك، فان أحد المتغيّرين هو السرعة والآخر موضع «الرقّاص». ويتغيران باستمرار، فيرسمان مجموعة من النقاط تظهر على شكل لولب متكرر. وبزيادة الطاقة في النظام، تصبح الأرجحة أسرع وأوسع نطاقاً، فيرسم فضاء الحال شكل لولب مماثل للسابق، لكنه أكبر.

مع إضافة عنصر واقعي، مثل الاحتكاك، تتغيّر تلك الصورة. لا نحتاج إلى المُعادلات لمعرفة مصير «رقّاص ساعة» يتأرجح مع وجود الاحتكاك. إنه يتوقف. كل مدار يجب أن ينتهي إلى المكان والمركز نفسيهما: صفر سرعة وصفر موقع. إن تلك النقطة المركزية

«تجذب» المدارات. بدل أن تتلولب إلى ما لا نهاية، في حال «الرقّاص» من دون الاحتكاك، فإنها ترسم لولباً متجهاً إلى الداخل. يُبدّد الاحتكاك الطاقة في النظام. ويُعبّر التبدّد عن نفسه في فضاء الحال على هيئة جذب نحو المركز، والاتجاه من المناطق الخارجية حيث الطاقة مرتفعة، إلى المناطق الداخلية الخفيضة الطاقة. يشبه هذا الجاذب، وهو الأبسط إطلاقاً، مغناطيساً بحجم رأس الدبّوس مستقراً في قلب ذلك الفضاء.

ثمة ميزة للتفكير في الحالات باعتبارها نقاطاً في الفضاء، فذلك يُسهّل مراقبتها.

إن النظام الذي تتبدل متغيّراته باستمرار، صعوداً وهبوطاً، يصبح نقطة متحرّكة، مثل فراشة تدور في غرفة مقفلة. إذا لم يحدث اتحاد بين بعض المتغيّرات، يستطيع العلماء تخيّل قسم من تلك الغرفة باعتبارها الحدود الخارجية. لا تُغادرها الفراشة البتة. وإذا تصرف النظام بشكل دوري، بمعنى أن يعود إلى الحال نفسها مُجدّداً، فإن الفراشة ترسم شكلاً لولبياً، يكرر المرور في الموقع نفسه داخل فضاء الحال. وتُظهر صور فضاء الحال للنُّظُم الفيزيائية أنماطاً من الحركة لا يمكن ملاحظتها بأي طريقة أُخرى، مثلما تظهر الصور المُلتقطة بالأشعة تحت الحمراء ما لا تلتقطه العين البشرية. وعندما يتأمل عالم في صورة فضاء الحال، ينقله خياله إلى تصوّر النظام نفسه. هذا اللولب يشير إلى وجود انتظام دوري؛ وذاك الانحناء يشير إلى تغيير، وتلك المساحة الفارغة تُعبِّر عن استحالة فيزيائية وهكذا دواليك.

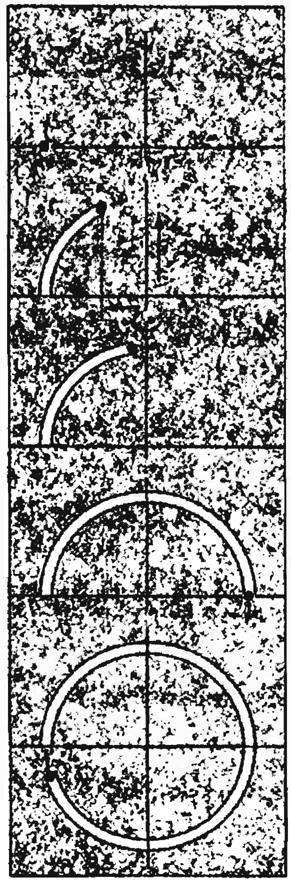
حتى باستعمال بُعدَين، تُقدّم صور فضاء الحال الكثير من المُفاجآت، ويمكن رؤية بعضها على سطح مكتب الكومبيوتر، حيث تتحوّل المُعادلات الحسابية إلى رسوم مُلوّنة. وشرع بعض الفيزيائيين في صنع أفلام وأشرطة فيديو عن النُّظُم الديناميكية كما ترتسم في فضاء الحال. وأصدر بعض علماء الرياضيات في كاليفورنيا كتباً تُظهر النُّظُم الفيزيائية عبر صور ملونة بالأخضر والأزرق والأحمر، على طريقة الرسوم المُتحرّكة، وسمّوها «الرسوم المُضحكة لنظرية الفوضى» (كايوس كوميكس). ولا تستطيع الرسوم ذات البُعدين تغطية كل ما يريد الفيزيائيون دراسته. إذ تقتضي دراسة

نظام بثلاثة متغيّرات استخدام أبعاد ثلاثة وهكذا دواليك. إن كل جزء متحرك باستقلالية في النظام الديناميكي، يُصبح مُتغيّراً يتطلّب درجة أُخرى من الحرية التي بدورها تتطلّب، بُعداً خاصاً بها في فضاء الحال وذلك لضمان أن تُكثّف النقطة معلومات كافية للتعبير عن حال النظام بتفرد. ضمت المُعادلات التي درسها روبرت ماي بُعدًاً وحيداً، فاكتفى بالرقم المنفرد كأن يُعبّر الرقم عن الحرارة أو عن عدد السكان. وظهر الرقم على هيئة نقطة في خط ذي بُعد وحيد. وتضمن نظام لورنز عن الطقس، على رغم اختزاليته، أبعاداً ثلاثة، لأنه نظر إلى ثلاثة مناحي مستقلة في كل لحظة من لحظات النظام. إن الصور التي تضم أبعاداً متعددة، خمسة أو أكثر، ترهق عين أكثر الطوبولوجيين تدريباً.

وفي المقابل، تملك النُّظُم المُعقّدة مجموعة من المتغيّرات المستقلة. وتحتّم على علماء الرياضيات قبول حقيقة أن النُّظُم التي تحوز عدداً من درجات الحرية تتطلب فضاء حال بأبعاد لا متناهية.

وتمثّل تلك النُّظُم الطبيعة غير المروّضة كحال شلال هادر أو دماغ يتصرّف بطريقة غير متوقّعة.

ثمة سبب وجيه يدفع الفيزيائي لرفض النموذج الغامض عن الطبيعة. إن استعمال المُعادلات اللاخطية في وصف حركة السوائل يجعل الكومبيوترات الخارقة عاجزة عن التتبع الدقيق للتدفق المُضطرب، حتى لكمية لا تتجاوز السنتيمتر المُكعب ولمدة لا تزيد على بضع ثوان. ويرجع ذلك إلى تعقّد الظواهر الطبيعية، وليس للتعقيد الظاهري في مُعادلات لانداو، التي لم تستطع تبسيط الأمور أيضاً. وفي غياب المعلومات المناسبة، يُحسّ الفيزيائي بأن ثمة قانوناً خفياً يراوغه، ولم يُكتشف بعد. وعبّر العالم الكبير في الفيزياء الكمومية ريتشارد فايمان عن ذلك الإحساس بقوله: «لقد أرقني دوماً أنه، وبالنسبة إلى القوانين كما نفهمها اليوم، يلزم الآلات الحاسبة لإجراء عمليات منطقية لا نهاية لها لكي تصل إلى تصور ما الذي يحدث في حيّز صغير وخلال زمن قصير. كيف يمكن أن

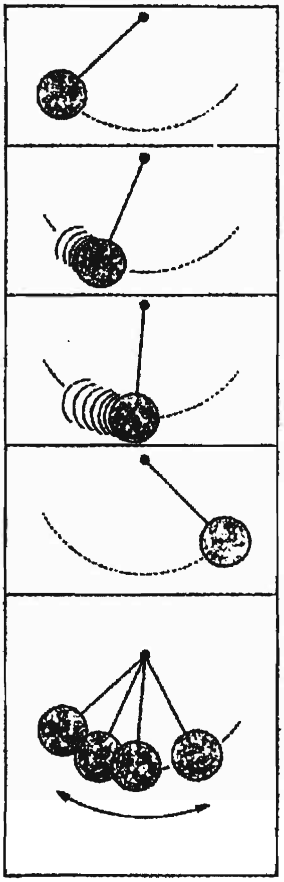


فـي بـدايـة تـأرجـح «رقّـاص الساعة»، تكون سرعته صفراً. ويُرسم الوضع بقيمة عددية سلبية إلى شمال المركز.

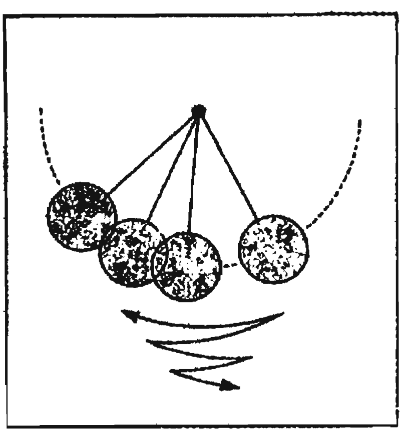
مع التأرجح، تعطي قيماً عددية ايجابية للسرعة التي يسير بها «رقّاص الساعة».

تصل السرعة إلى ذروتها حين يمر «الرقّاص» بالمركز.

تشرع السرعة في الانخفاض، ثم تصبح قيمتها سلبية، فتُرسم إلى الشمال من المركز.

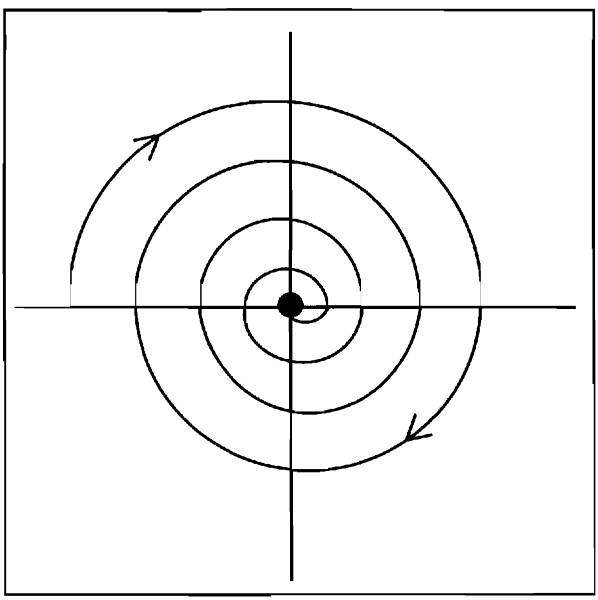


طريقة أُخرى للنظر إلى حركة رقّاص الساعة. إن نقطة في فضاء الحال (أعلاه إلى اليمين) تحوي المعلومات كلها عن وضعية النظام الديناميكي في لحظة ما (أعلاه إلى اليسار). وبالنسبة للرقّاص، يكفي عددان، السرعة والموضع، لوصف النظام. تتبع النقطة مساراً يُشكل طريقة لتحويل السلوك المستمر الطويل الأمد للنظام إلى شكل مرئي. ويمثّل بالشكل اللولبي المتكرر عبر دورات منتظمة. إذا صار السلوك المُتكرّر ثابتاً، كما في رقّاص الساعة، يعود النظام إلى مداره بعد اهتزازات صغيرة. وفي فضاء الحال، تصبح المسارات قريبة المدار، فكأن المدار صار جاذباً بالنسبة إليها.



تحدث تلك الأمور كلها في حيّز ضيق؟ ولماذا يستلزم فهم قطعة محدودة في الزمان والمكان، كمية لا محدودة من المنطق؟»

كالكثيرين ممن شرعوا في دراسة الكايوس، خمّن ديفيد ريبال أن الأنماط المرئية من الاضطراب في التدفق تعكس أنماطاً يمكن تفسيرها بقوانين لم تُكتشف بعد. وفكّر أنّ التبدّد في الطاقة في التدفق المُضطرب يمكن أن يوصل إلى نوع من تقلّص فضاء الحيز، بمعنى الانشداد نحو جاذب ما. ورجّح ألا يقتصر ذلك الجاذب على نقطة ثابتة، لأن التدفق لا يمر بحال من السكون. إن الطاقة تدخل إلى النظام ثم تتبدد. فأي نوع من الجاذب في استطاعته أن يُفسّر ذلك الأمر؟ وبحسب التفكير النمطي، ثمة احتمال وحيد: أن يكون الجاذب الآخر من نوع دوري. ويرتسم في فضاء الحال كدورة محدودة، بمعنى أنه يرسم مداراً تنجذب إليه المدارات القريبة كلها. فإذا أُضيفت كمية من الطاقة إلى رقّاص الساعة من مصدر خارجي، يرتسم مداره الثابت على هيئة خط لولبي مقفل ما يُمثل التأرجح المنتظم لرقّاص ساعات الحائط القديمة.



جاذب على هيئة نقطة: بالنسبة إلى رقّاص ساعة يخسر طاقته باستمرار بسبب الاحتكاك، تلتف المسارات كلها لتتجه صوب نقطة في الداخل تُمثّل الحال المستقرة، وهي، في هذا المثال، نقطة السكون.

فبغض النظر عن نقطة البداية، يستقر «رقّاص الساعة» في هذا المدار. ولكن، ألا يمكن تحدّي هذه المقولة؟ إذا كانت الظروف الأولية للحركة تنطلق في ظل كمية قليلة من الطاقة، فإن «رقّاص الساعة» يسير نحو التوقّف؛ وبذا يحوز النظام جاذبين: نقطة ثابتة (حال السكون) والخط اللولبي المقفل. ويصنع كل جاذب «حوضاً» من الطاقة حوله، كنهرين متجاورين لكل منهما مصب خاص به.

في المدى القصير، تستطيع أي نقطة في فضاء الحال أن تُعبّر عن سلوك نظام ديناميكي. وفي المدى البعيد، تُضحي الجواذب هي السلوكيات الممكنة للنظام حصرياً. وبذا، فإن الأنواع الباقية من الحركة تُعد مراحل عابرة. وتعريفاً، يملك الجاذب خاصية الاستقرار، مما يوازي القول، في النظام الحقيقي، إن الأقسام المتحركة في النظام تتعرض للكثير من التشوش لكنها ترجع إلى الجاذب. إذا ضربت قطة على «رقّاص ساعة» متوقف، فإنه يتأرجح على نحو عابر ولا يستمر في الحراك ستين دقيقة. ويبدو الاضطراب في السوائل من نوع آخر، لأنه لا يُعطي أي إيقاع ثابت بحيث يستثني الحركات الأخرى. والمعلوم عن الاضطراب في السوائل أنه يستحضر المروحة الكاملة لاحتمالات الحركة الدورية، دفعة واحدة.

يشبه هذا الاضطراب تشوشاً ساكناً. إذاً، هل في مقدور نظام من المُعادلات الحتمية البسيطة أن يُعبّر عنه ويصفه؟

تتساءل رييال وتاكنز عن إمكان وجود جاذب من نوع آخر، يملك المواصفات المطلوبة. فيكون مستقراً، بحيث يمثّل الحال النهائي للنظام الديناميكي في ظل التشوش. ولا يحوز سوى القليل من الأبعاد بحيث يُشبه مداره في فضاء الحال مُكعباً أو مستطيلاً، مع القليل من درجات الحرية. ويتواتر بإيقاع غير دوري، بحيث لا يُكرّر نفسه إطلاقاً، ولا يصل إلى حال السكون. شكّل سؤال رييال وتاكنز مُعضلة لعلم الهندسة: أي مدار ذاك الذي يمكن رسمه في فضاء الحال بحيث لا يُكرر نفسه ولا يتقاطع مع نفسه أيضاً؛ لأن التقاطع يعني عودة النظام إلى حال كانه سابقاً، مما يعني أنه سيُكرر المسار

عينه. ولكي تُعبّر عن كل إيقاع، يجب على ذلك المدار أن يكون خطاً لا نهائياً في حيز محدود. وبقول آخر، يجب على مدار ذلك الجاذب أن يتخذ شكلاً مُتكرّراً مُتغيّراً، أي شكلاً فراكتالياً. لكن تلك الكلمة لم تكن قد صيغت بعد.

وباستخدام المنطق الهندسي، زعم رييال وتاكنز أن شيئاً مثل الجاذب المتكرّر المتغيّر يجب أن يكون موجوداً. لم يرياه. ولم يرسماه. لكنهما حدسا بوجوده. ولاحقاً، خلال خطبة في «مؤتمر علماء الرياضيات» في وارسو (عاصمة بولندا)، أوضح رييال: «تمييز رد فعل المجتمع العلمي على تلك الفكرة ببرود. فقد بدا القول بوجود طيف مستمر مع درجات قليلة من الحرية وكأنه هرطقة في علم الفيزياء». والمفارقة أن حفنة من علماء الفيزياء أدركوا أهمية الورقة التي عرضها رييال وتاكنز في العام ١٩٧١، فشرعوا في العمل عليها.

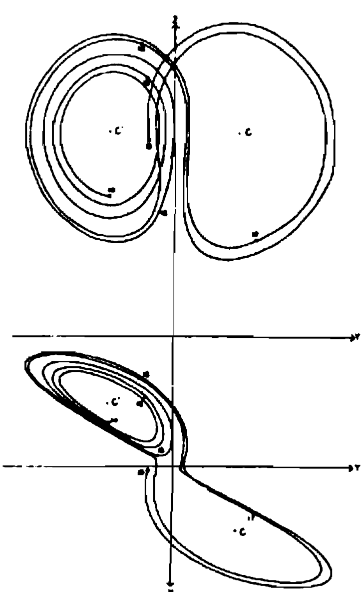
في العام ١٩٧١، احتوت الأدبيات العلمية على خط صغير يرسم الوحش الخرافي الذي تحدث عنه رييال وتاكنز. فقد ألحقَهُ إدوارد لورنز في ورقته المنشورة في العام ١٩٦٣ عن حتمية الكايوس. ولم يزد رسم لورنز عن منحنيين على اليمين، أحدهما داخل الآخر، وخمسة منحنيات على اليسار. ولكي تُرسم سبعة خطوط لولبية، يجب إجراء ٥٠٠ عملية حسابية على الكومبيوتر.

إن نقطة تتحرك على مسارها في فضاء الحال، حول الخطوط اللولبية، تظهر الدوران الفوضوي البطيء لتيارات نقل الحرارة بالحمل في السائل، والتي وصفها لورنز بثلاث معادلات. ولأن ذلك النظام احتوى على ثلاثة متغيّرات مستقلة، ظهر الجاذب في فضاء الحال ثلاثي الأبعاد. ومع أن لورنز رسم قسماً منه، فقد بدا الشكل النهائي لذلك الجاذب الغريب واضحاً: شكل يُشبه جناحي فراشة مُكوَّن من مجموعات من الخطوط الأنشوطية الشكل التي يعبر كل منها من جناح إلى آخر. وعند تسخين النظام، تميل حركة السائل نحو أحد الجناحين (اليمين)، وعندما تتوقّف الحركة الدورانية وتعكس نفسها، يميل مسار النظام إلى الجناح الآخر.

يتميّز جاذب لورنز بأنه مستقر وغير دوري وقليل الأبعاد. وكذلك لا يتقاطع مع نفسه، أي أنه لا يُكرر أياً من حركاته. وبذا، فإن الخطوط اللولبية والأنشوطية التي تُكوّنه لا تتصل فعلياً. ومع ذلك، فإنها تبقى ضمن حيّز محدود، كأنها في علبة. كيف يمكن التوصل إلى ذلك الأمر؟ كيف لمسارات لا نهائية أن تُحصر في حيز محدود؟

في حقبة ما قبل شيوع صور ماندلبروت عن هندسة الفراكتال في الوسط العلمي، صَعُبَ على كثيرين تخيّل طريقة صنع الشكل الذي يشير إلى جاذب لورنز. المفارقة أن لورنز نفسه أقر بوجود «تناقض ظاهر» في رسمه المبدئي، وكتب: «من الصعب التوفيق بين مزج مسطحين، يحتوي كل منهما على خطوط لولبية، مع عدم تلاحم مسارين على الأقل». ولاحقاً، توصّل لورنز إلى إجابة يصعب أن تظهر عبر المُعادلات القليلة التي استخدمها في رسم الجاذب الذي كان الأول تاريخياً.

وأدرك أن السبيل الوحيد لحصول ذلك يأتي عبر انقسام المسطح إلى طبقات عدّة، مثل شكل الحلوى الفرنسية الشهيرة باسم «ألف ورقة» (ميل فاي). «نرى أن كل مسطّح



الجاذب الغريب الأول: في العام ١٩٦٣، استطاع لورنز احتساب الخطوط الأولى من الجاذب الذي ظهر في نظام صنعه من معادلات بسيطة؛ لكنه أدرك أيضاً أن شكل الجناحين اللولبيين للجاذب يجب أن يتضمنا مقاييس فائقة الصغر.

يتكون فعلياً من مُسطحين. لذا، فعندما يظهر أنهما يتقاطعان، يكون الأمر فعلياً أنهما يُكوّنان أربعة أسطح. ومع تكرار هذه العملية كرّة أُخرى نحصل على ثمانية أسطح، وهكذا. وفي النتيجة نحصل على مسطحات مُعقدة لا متناهية». ولذا، لم يبد مستهجناً أن يترك لورنز في العام ١٩٦٣ الأمر عند هذه النقطة التي أثارت إعجاب ريبال ودهشته بعد عقد منْ السنين، عندما درس أعمال لورنز بتعمّق. وذات مرّة، زار ريبال لورنز، لكن لقاءهما جرى في جو اجتماعي محض، بإصرار من لورنز الذي اقترح أن يزورا أحد المتاحف الفنية بصحبة زوجتيهما.

سارت الجهود التي هدفت لمتابعة إنجازات ريبال وتاكنز في مسارين. فقد فضّل بعضهم الانهماك في العمل النظري لصنع صورة بصرية للجواذب الغريبة. هل كان جاذب لورنز نموذجياً؟ هل هنالك أنواع وأشكال أُخرى؟

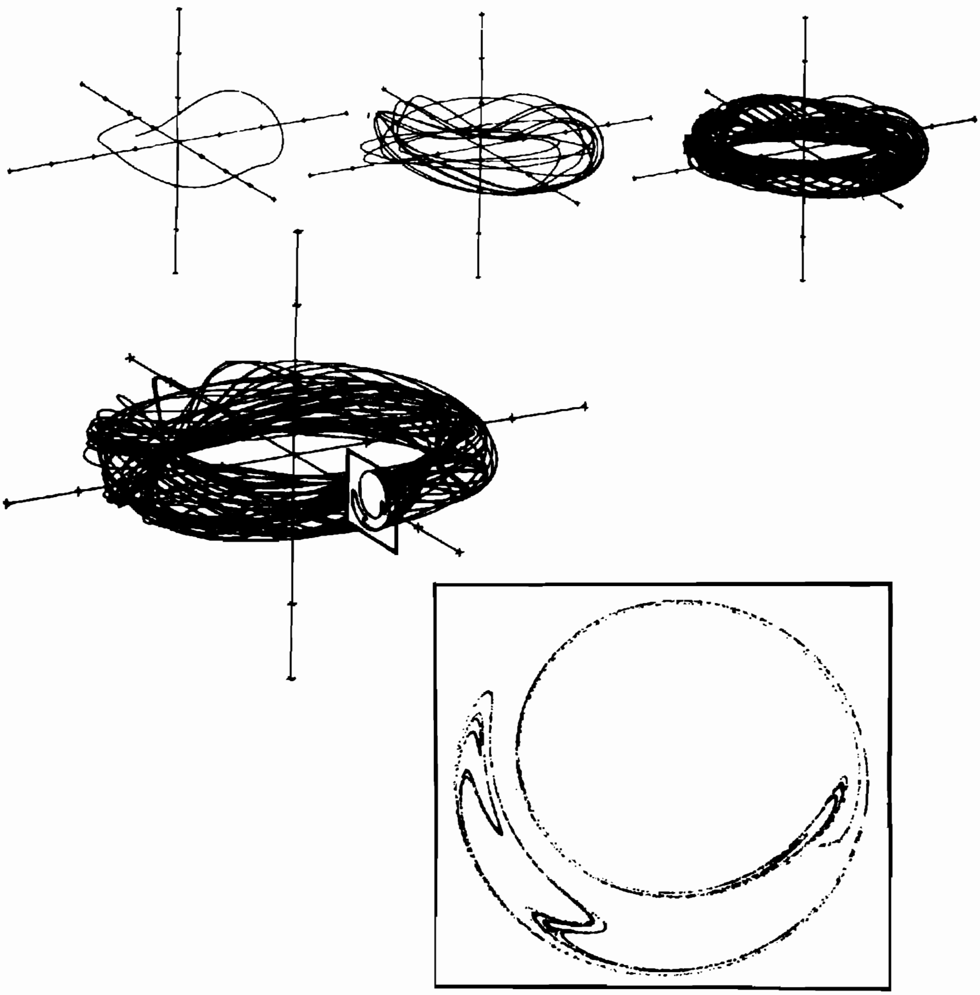
كذلك مال بعضهم للعمل تجريبياً على مقولات ريبال وتاكنز لإثبات أو نفي ما تدعيه من وجود الجواذب الغريبة في فوضى الطبيعة.

في اليابان، درس يوشيسوكي يودا الدارات الكهربائية التي تُقلّد عمل الزنبركات الميكانيكية، ولكن بسرعة أكبر. وقاده الأمر إلى اكتشاف مجموعة جميلة وغرائبية من الجواذب. وقوبل عمله شرقاً ببرود شبيه بما قوبلت به أعمال ريبال غرباً. وإذ اعتبرت مجرد عمل رتيب على الذبذبات الدورية، فقد طولب بألا يغوص بعيداً في مفهوم الحال الساكن. وفي ألمانيا، اهتم أوتو روسلر، وهو طبيب لم يزاول مهنته، بالكايوس من طريق الكيمياء والبيولوجيا النظرية. وشرع في العمل فلسفياً على مفهوم الجواذب الغريبة. وارتبط اسمه مع نموذج مُبسّط عن الجاذب، يتألف من شريط ملتفٍ على نفسه. وقد شاع بسبب سهولة رسمه. ونظّر أيضاً لوجود جواذب بأبعاد متعددة مثل «نقانق، داخل نقانق، داخل نقانق... يمكن استخراجها وطيّ بعضها على بعض ثم ضغطها وإعادتها إلى حيث كانت». وفعلياً، يعتبر طي الحيّز وضغطه في صُلب عمل الجواذب الغريبة، وربما المفتاح الأساس لديناميكيات النُظُم الحقيقية التي تولّد تلك الجواذب.

أحسّ روسلر بأن تلك الأشكال منبثّة في مبدأ التنظيم الذاتي عالمياً. وعمل على خيال لجورب من الهواء في حقل مفتوح. «تدخل الريح الجورب من ثقب، ثم تنحصر فيه. وخلافاً لإرادتها، تصنع الطاقة شيئاً منتجاً، وتتفاعل مع مبدأ التداخل الذاتي في الطبيعة، فيولد الجمال». ليس هيّناً صنع صور عن الجواذب الغريبة. فتقليدياً، تنحو المدارات للالتفاف في مسارات متزايدة التعقيد، عبر أبعاد ثلاثة أو أكثر، فتصنع «خربشة» معتمة بحيث لا يُرى من الخارج ما تحتوي عليه. ولتحويل تلك الصور المتداخلة الثلاثية الأبعاد إلى صور مُسطّحة، استخدم العلماء أولاً تقنية المساقط، فظهرت رسوم تعبر عن الخيال الذي يُسقطه الجاذب على سطح مُعيّن. ومع ظهور جواذب مُعقّدة التركيب، يصبح المسقط مُجرد كتلة مبهمة من الخطوط. لذا، عمد العلماء لاستعمال خريطة الرجوع، التي تُسمى أيضاً خريطة بوانكاريه، التي تعني صنع مقطع على امتداد الجاذب، ثم استخلاص شكل مُسطّح مؤلف من بُعدين.

وتُزيل خريطة بوانكاريه بُعداً من الجاذب، كما تحوّل الخطوط المُتّصلة إلى مجموعة من النقاط. ومع اختزال الجاذب إلى خريطة بوانكاريه، افترض العلماء أنها تحتفظ بالسمات الأساسية للحركة فيه. وتمكنوا من نقل حركة الجاذب إلى شاشات الكومبيوتر، فظهرت تلك المدارات التي تُحوّم وتصعد وتهبط وتميل شمالاً ويميناً وتتأرجح ذهاباً وإياباً. ويترك كل مدار نقطة مُضيئة على الشاشة، فترتسم أشكال عشوائية أحياناً ومُنسّقة في أحيان أخرى.

وتؤدي هذه العملية للحصول على عيّنات عدّة عن وضعية النظام، وليس لرصده باستمرار. ولكن، متى تؤخذ تلك العيّنات، وما هي الطريقة الملائمة لإجرائها؟ قاد هذا السؤال إلى نشر نوع من المرونة في عمل الباحثين. فلربما كانت الفترة الأكثر تعبيراً عن وضعية نظام ديناميكي تتناسب مع ملمح فيزيائي فيه. وللمثال، تُعطي خريطة بوانكاريه عيّنة من السرعة التي يقفز فيها «رقاص الساعة» صعوداً، في كل مرّة يُغادر أدنى نقطة في



التعرّف إلى بُنية الجاذب: يتألف الجاذب الغريب، (في الأعلى)، من مدار وحيد. ثم يرتفع العدد إلى مئة، مما يُظهر حركة عشوائية في «رقّاص ساعة» يسير في حركة دائرية بدفع منتظم من الخارج. ومع وصول العدد إلى ألف مدار (في الأسفل) يغدو الجاذب خربشة قاتمة. لكي نعرف بُنيته، يمكن الكومبيوتر أن يصطنع مقطعاً فيه، ما يُسمى «مقطع بوانكاريه». ويقلص المقطع الأبعاد الثلاثة في الصورة إلى بُعدين. وفي كل مرة يمر فيها مدار الجاذب في المقطع، تظهر نقطة. وتتجمع تلك النقاط فتعطي نمطاً. وفي الرسم، ثمة ٨٠٠٠ نقطة، تُعبّر كل منها عن مدار تام حول الجاذب. وبالنتيجة، تُستخلص عيّنات عبر فترات منتظمة. صحيح أن قسماً من المعلومات يختفي، لكن الأقسام الأُخرى تُصبح أشد وضوحاً.

مساره. ولربما اختار العلماء أخذ عينات عبر فترات زمنية متساوية، كأنهم يلتقطون صوراً ثابتة عن حركة سيارة مثلاً.

وأياً تكن الطرق التي اتبعت، فقد أدّت تلك الصور أخيراً إلى إظهار التركيب الفائق الصغر، الذي حدس إدوارد لورنز بوجوده!

أُلقيَ ضوء قوي على مفهوم الجاذب الغريب نتيجة جهود عالم بعيد عن ألغاز الاضطراب وديناميكا السوائل. ولم يمنع ذلك البُعد الفرنسي ميشيل هينو من ابتكار الجاذب الأبسط الذي أثار مفهومه بقوة. عمل هينو في «مرقب نيس للفلك» على الساحل الجنوبي لفرنسا.

والمعلوم أن النُّظُم الديناميكية ابتدأت على يد الفلكيين إسحاق نيوتن وهنري لابلاس اللذين استلهما فكرتها من الحركة المنتظمة للكواكب. ولاحقاً، تبيّن أن حركة الكواكب تختلف كثيراً عن النُّظُم الأرضية. إن النُّظُم التي تخسر طاقتها تدريجاً بالاحتكاك، تصل إلى التبدد، وذلك ما لا يحصل في النُّظُم الفلكية التي تُحافظ على طاقتها. والحق أن النُّظُم الفلكية تُعاني بعض التبدّد الهيّن في الطاقة نتيجة التداخل في طاقة النجوم وإشعاعاتها، لكن حذفها لا يُخلّ في حسابات الفلكيين كثيراً. ومع استبعاد التبدّد، فإن فضاء الحال لا ينطوي ولا يتقلص بالطريقة التي تؤدي إلى ظهور تلك الطبقات المتناهية الصغر، التي تلزم لحدوث التكرّار المُتغيّر. إذا لم يظهر الفراكتال في الفضاء، فهل يظهر الكايوس؟

أمضى علم الفلك آجالاً طويلة من دون الالتفات إلى النُّظُم الديناميكية. واختار هينو أن يخرج عن هذا التقليد القوي. فقد ولد في باريس عام ١٩٣١، مما يعني أنه يصغر لورنز بسنوات، لكن تشارك الرجلان في تعطشهما للعمل بالرياضيات.

مال هينو للتعامل مع المسائل الصغيرة الملموسة التي يمكن ربطها بأوضاع فيزيائية، وهذا ما خالف الوضع الذي كان عليه علماء الرياضيات حينذاك. وعندما وصلت الكومبيوترات إلى حجم يسمح للهواة باقتنائها، اشترى هينو أحدها، ومن نوع «هيثكيت». ووضعه في داره. وقبل ذلك بكثير، أبدى اهتماماً بإحدى المسائل العويصة في

علم الديناميكا. تتعلق تلك المسألة بالتجمعات النجمية، حيث تلتقي الملايين منها أحياناً في مكان معين، لتؤلف أحد أجمل المشاهد التي رأتها عين بشري ليلاً. يُنظر إلى التجمّعات النجمية باعتبارها مكاناً تتكاثف فيه النجوم. ولذا، ثار السؤال دوماً، وخصوصاً في القرن العشرين، عن الطريقة التي تبقى فيها تلك النجوم قريبة بعضها من بعض، وكيف تُتطور علاقاتها مع مر الزمن.

ومن وجهة نظر علم الديناميكا، تُعطي التجمعات النجمية نموذجاً عن النظام الذي يحوي أجساماً عدّة.

لقد توصّل نيوتن إلى حل مسألة النظام المؤلف من جسمين، مثل الأرض والقمر. يسلك كل جسم منهما مساراً إهليليجياً في دورانه حول مركز النظام، أي الشمس في هذه الحال. وتؤدي إضافة جسم ثالث إلى اضطراب هذه الصورة. واعتقد بوانكاريه بأن النظام الثلاثي مستحيل. إذ يمكن احتساب المدارات لفترة مُعينة. وإذا استُعملت الكومبيوترات القوية، يمكن إجراء ذلك الحساب لفترة أكثر بُعداً، ثم تندلع أنواع من اللاتيقّن. ولا يمكن حلّ تلك المُعادلات بالتحليل الرياضي، مما يعني أن الأسئلة البعيدة المدى عن النظام الثلاثي الأجرام لا إجابة عنها. هل النظام الشمسي مُستقر؟ يبدو كذلك، لفترة معينة. وحتى اليوم، لا أحد يعلم بثقة متى تخرج مدارات أحد الأجرام عن المألوف، فتغادر النظام إلى الأبد!

لكن التجمع النجمي أكثر تعقيداً بكثير. وليس مُجرد نظام متعدد الأجسام. وفي المقابل، يمكن دراسة دينامياته بعد التسليم ببعض التنازلات. فمن المنطقي، مثلاً، التفكير بأن النجوم المفردة تجري في مداراتها عبر حقل جاذبية منسجم له مركز ثقل مُحدّد. وكثيراً ما تتقارب نجمتان إلى حد أن تأثرهما المتبادل يصبح عنصراً تجدر دراسته على حدة.

كما أدرك الفلكيون أن تجمعات النجوم ليست ثابتة بالضرورة. وتظهر نُظُم ثنائية في داخلها، يتألف كلّ منها من نجمين متزاوجين، فإذا اقترب نجم ثالث منهما، يتلقى أحد

أطراف المثلث دفعة قوية. وأحياناً، تصل هذه الدفعة إلى حد يكفي لطرد نجم ما خارج التجمّع، فيتقلص التجمّع برمته قليلاً. وعندما شرع هينو في درس تلك المسألة في أطروحته لنيل الدكتوراه، في باريس ١٩٦٠، اتّخذ لنفسه افتراضاً عشوائياً يقول إن تغيّر المقياس في التجمع، كالحال عند التقلّص، يجري عبر عملية من التشابه الذاتي. ولدى إجراء الحُسابات اللازمة، توصّل إلى نتيجة مدهشة. إذ تبيّن له أن قلب التجمّع قد ينهار، فيكتسب طاقة حركية ويسعى إلى وضعية من الكثافة اللامحدودة. بدا هذا الاستنتاج صعباً على الخيال، كما لم تؤيده الشواهد المتأتية من مراقبة التجمعات النجمية. ولكن نظرية هينو شقت طريقها ببطء، وعُرفت لاحقاً باسم «الانهيار الحراري التجاذبي».

واكتسب هينو ثقة بمقولاته. وانطلق ليجرّب تطبيق قواعد الرياضيات على مسائل فلكية قديمة، متوقعاً الحصول على نتائج غير مألوفة. واختار الانطلاق من مسألة سهلة في ديناميكا النجوم.

زار جامعة برنستون في العام ١٩٦٢، فدخل عالم الكومبيوتر للمرة الأولى. وبدأ هينو في صنع نماذج كومبيوترية لمدارات النجوم حول مركز كوني. وفي شكل مُبسّط، تشبه تلك المدارات ما تتخذه الكواكب السيّارة في دورانها حول الشمس مثلاً. ويكمن الفرق في أن المركز الذي تدور حوله النجوم ليس نقطة، بل قرص له كثافة ثلاثية الأبعاد.

وصاغ هينو تسوية مع المُعادلات التفاضلية. وبحسب رأيه: «للحصول على الحرية في التجربة، تجاهلت الأصل الفلكي للمسألة». وتعني «الحرية في التجربة»، في جزء منها، حريّة التلاعب بتلك المسألة على الكومبيوتر البدائي الذي امتلكه. لم يكن فائق القوة. ولم تزد ذاكرته على واحد في الألف من رقاقة واحدة في الكومبيوترات التي ستشيع في الأسواق، بعد ربع قرن. لكن ذلك التبسيط، أعطى مردوداً جيداً، كالكثير من التجارب على نظرية الكايوس. فبتجريد لبّ المسألة في نظامه، استطاع اكتشاف الكثير مما يمكن تطبيقه على نُظُم أُخرى أيضاً، بما فيها نُظُم أكثر أهمية.

وبعد سنوات من عمل هينو، ظلّت المدارات الكونية لعبة نظرية، لكن ديناميكيات تلك

النُّظُم باتت تخضع لدراسة مُعمّقة يتولاّها باحثون يشتغلون على مدارات الجُسيمات الدقيقة في الذرة باستخدام المُسرّعات الهائلة الطاقة.

إن المدارات النجمية في المجرّات، عبر مقياس من الوقت بمقدار مائتي مليون سنة، تتخذ شكلاً ثلاثي الأبعاد، بدل الشكل الإهليليجي المألوف في مدارات الكواكبُ السيّارة. ويصعب صنع مُعادل بصري لمدارات النجوم. ولذا، استعمل هينو تقنية مُشابهة لتلك المستخدمة في خرائط بوانكاريه. وتغير ورقة ضخمة مثبتة عمودياً على حافة المجرّة بحيث تمر بها مدارات النجوم، كما تمر الخيول المتنافسة بخط النهاية في ميدان السباق. وعبَّر عن تقاطع المدار مع الورقة بنقطة. وأخذ يتابع تلك النقاط. التي رسمها هينو باليد، لكن علماء آخرين رسموها باستعمال الكومبيوتر. وظهرت بتتابع كأنها أنوار أعمدة الكهرباء التي تُضاء بتتابع عند هبوط الليل. تظهر نقطة ما على القسم الأسفل من يسار الورقة. ثم تظهر النقطة التالية على بعد مسافة قليلة منها إلى اليمين. وتظهر ثالثة على يمين الثانية، ولكن أعلى قليلاً وهكذا.

في البداية، لم تتبع تلك النقاط نسقاً واضحاً، ثم تجمعت لتُعطي منحنى له شكل يُشبه البيضة. ثم تتالت النقاط لترسم خطوطاً شبه دائرية حول البيضة التي باتت أكثر وضوحاً. لم تكن المدارات منتظمة، ولم تُكرّر نفسها البتة، لكنها بدت قابلة للتوقع، وبعيدة من العشوائية. لم تصل إلى داخل المنحنى، ولم تخرج عنه. وإذا أعيدت تلك المدارات إلى أبعادها الثلاثية، فإنها تتخذ شكل قرنَي الثور أو الكعكة الأميركية المُحلاة. وبدت رسوم هينو كمقطع طولي في قرني ثور. عند هذا الحدّ، لم يُضف هينو شيئاً إلى ما عرفه العلماء سابقاً. وبدت المدارات دورية. وبين عامي ١٩١٠ و١٩٣٠، انقطع فريق من الفلكيين لمراقبة مئات من تلك المدارات ورصد حساباتها؛ لكنهم ركزوا على المدارات الدورية. وبحسب تعبير هينو: «اقتنعت أيضاً، كالجميع حينذاك، أن كل المدارات منتظمة». ولكنه عكف، بمعاونة تلميذه كارل هيليس (من جامعة برنستون)، على درس المدارات

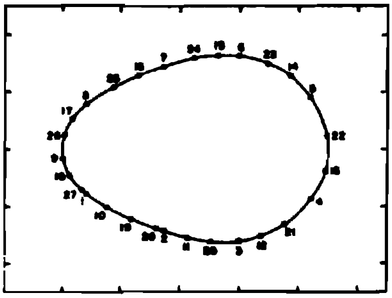
المُغايرة، مع زيادة مستوى طاقة النظام التجريدي الذي ثبّتوه على الكومبيوتر. وسرعان ما ظهر شيء لم يكن متوقعاً.

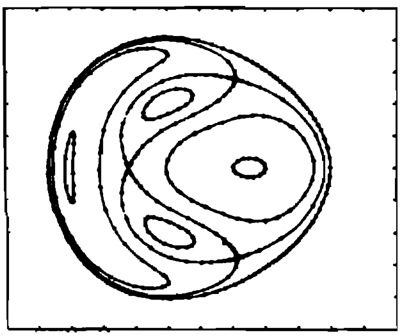
في البداية، التوى شكل البيضة، ليصبح شيئاً مُعقَّداً، عابراً فوق نفسه كل ثماني مرات، قبل أن ينقسم إلى خطوط لولبية مستقلة. ومع ذلك، رسم كل مدار لولباً. ومع زيادة الطاقة، تغيّرت الأشياء بصورة مُفاجئة. ولاحقاً، كتب هينو وهيليس: «كانت مُفاجأة». بعض المدارات أصبحت غير ثابتة إلى حدّ أن نقاطها تناثرت عبر الورقة كلها، فرسمت منحنى في مكان ولم يظهر أي رسم في أمكنة أخرى. وباتت الصورة درامية؛ فأعطت دليلاً على لا انتظام تامّ وممتزج ببقايا انتظام، وكوّنت أشكالاً تُشبه «الجُزُر» و«سلاسل من الجُزُر». وحاولا الأمر عينه على كومبيوترين مع استعمال وسيلتين مختلفتين في المُعادلات التكاملية. وظهرت تلك النتائج عينها. لم يبق أمامهما سوى المراقبة والتقصي. وبناء على تجربتهما العددية، فكّرا في البنية العميقة التي تكمن خلف تلك الصور. وذهب ظنّهما إلى أن استخدام التكبير، قد يُظهر المزيد من الجُزُر على مقاييس أصغر، ربما بأعداد لا نهائية.

ولم يتوافر إثبات رياضي على ذلك، لأن صنعه ليس أمراً سهلاً.

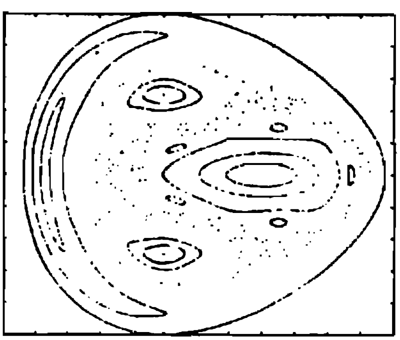
وبعد ١٤ سنة، التفت هينو صوب مسألة أُخرى. فقد سمع أخيراً عن الجواذب الغريبة التي عمل عليها إدوارد لورنز وديفيد ريبال. ففي العام ١٩٧٦، انتقل للعمل في «مرصد نيس للفلك»، الذي يُطل من قمة جبلية على البحر المتوسط. هناك، سمع من مُحاضر زائر عن جاذب لورنز. وقد جرّب المُحاضر، وهو اختصاصي في الفيزياء، سبلاً كثيرة لتقصي البنية الدقيقة للجاذب، من دون نجاح يُذكر. لم تكن النُّظُم التي تُبدّد الطاقة من اختصاص هينو، ولم يمنعه ذلك من التفكير في جاذب لورنز.

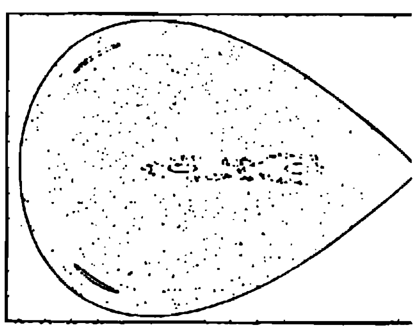
وقرر أن يتجاهل الجذور الفيزيائية للنظام، ليُركّز على الأساس الهندسي لما أراد درسه. ولاحظ هينو أن لورنز وآخرين التزموا العمل بالمُعادلات التفاضلية، لأن التدفق يعني تغيّراً مُستمراً في المكان والزمان، وهذا ما ألجأه إلى استعمال مُعادلات الفرق التي





مدارات حول مركز في مجرّة: لفهم مسار النجوم في المجرّة، احتسب ميشيل هينو تقاطع كل مدار مع مسطح. وظهرت أنساق تعتمد على الطاقة الكليّة للنظام. فرسمت النقاط الآتية من مدار ثابت، منحنى متصلاً ومنحنياً(إلى اليسار). وعند ارتفاع مستوى الطاقة، ظهرت أنساق مُعقّدة يمتزج فيها الثبات مع الكايوس، كما تمثلها المناطق المحتوية على نقاط متناثرة.





تدرس التغيّرات المتقطعة والمستقلة في الزمن. وآمن بأن حلّ المسألة كلّها يكمن في تكرار ثني فضاء الحال ومطّه على الطريقة التي تُصنع بها الكعكة المُحلاة بحيث يتضمن التركيب النهائي عدداً كبيراً من الطبقات الرقيقة. واختار هينو ورقة بيضاوية الشكل. ولمطّ تلك الورقة، بصورة افتراضية، لجأ إلى مُعادلة عددية تقدر على نقل أي نقطة على الورقة إلى الشكل الذي يتأتى من سحب مركز الورقة إلى الأعلى، أي إلى القوس. وباستعمال هذه الطريقة في الرسم، انتقل من نقطة إلى أُخرى إلى أن نقل نقاط الورقة كلها إلى شكل القوس. ثم اختار طريقة ثانية في صنع الخريطة، مستخدماً التقلّص الذي يصنع شكل قوس مُعاكس يتجه إلى الداخل، فيُقلصه. وفي طريقة ثالثة، ثنى القوس الضيّق على جنبه، بحيث وصل إلى مستوى الورقة البيضاوية الأصلية. ثم جمع الطُّرُق الثلاث في مُعادلة لتسهيل إجراء الحسابات. وفي جوهر الأمر، فقد اتّبع طريقة سمييل في «حدوة الحصان». ومن الناحية الحسابية، باتت الأمور سهلة إلى حدّ إجراء الحسابات على الآلة الحاسبة؛ لأنه توصّل إلى مُعادلة جبرية مباشرة مُكوَّنة من خطوتين، تحتسب كل خطوة أحد البُعدين اللذين يُحددان نقطة ما على رسم بياني. وتتضمن كل خطوة عنصراً ثابتاً. ثم تُكرر العملية عند النقطة الثانية وهكذا دواليك.

واختار هينو نقطة البداية عشوائياً. وبمساعدة آلته الحاسبة، شرع في رسم النقاط الواحدة تلو الأُخرى، إلى أن رسم آلافاً منها. ثم استعمل الكومبيوتر، وكان من نوع «آي بي أم ٧٠٤٠»، فرسم بسرعة ٥ ملايين نقطة.

وفي البداية، بدت النقاط وكأنها تتقافز اعتباطياً على شاشة الكومبيوتر. ويُشبه ذلك صنع مقطع بوانكاريه لجاذب ثلاثي الأبعاد، فيظهر أنه يتحرك بعشوائية عبر الشاشة. ولكن شكلاً ما شرع في التبلور تدريجاً. ورسم خطاً منحنياً يُشبه الموزة. وكُلما عمل البرنامج مدة أطول، ظهر المزيد من التفاصيل. بعض ملامح ذلك الشكل بات أشد كثافة، لكنه سرعان ما انحلّ مكوّناً خطّين منفصلين، ثم انحلا إلى زوجين، أحدهما قريب والآخر بعيد.

وباستخدام التكبير، ظهر أن كلاً من الخطوط الأربعة يتضمن خطين وهكذا إلى ما لا نهاية. وكحال جاذب لورنز، أظهر هينو تركيباً لا متناهياً، مثل لعبة الدمى الروسية، كل واحدة تحتوي على أخرى مُشابهة لها وأصغر منها، في داخلها. ويمكن رؤية تلك التفاصيل المتشابكة، كخطوط داخل خطوط، في شكلها النهائي عبر سلسلة من الصور باستخدام تكبير مُتدرّج القوة. ولكن أثر الجاذب يمكن استشعاره بطريقة أُخرى، عند ظهور النقاط الواحدة تلو الأُخرى. ويظهر كشبح في الضباب. إذ تظهر النقاط متناثرة على الشاشة بحيث لا تُعطي الانطباع أنها ترسم شكلاً ما، ولا أنها تحوي تركيباً مُعقّداً. وتبدو النقطتان كلتاهما وكأنهما على تباعد عشوائي، كأي نقطتين متجاورتين في تدفق مضطرب. وإذ يكون عدد النقاط هائلاً، فإن من المستحيل توقع النقطة الآتية، إلا بوجود جاذب قوي.

تهيم النقاط على وجهها عشوائياً، ويظهر الشكل بصورة أثيرية، فيستحيل تذكّر أن ذلك الشكل يصنعه جاذب. ليس مجرّد مسار في نظام ديناميكي، بل مسار تتجه صوبه المسارات الأُخرى كلها. ولهذا السبب، فلا أهمية لنقطة البداية، ما دامت على مسافة ما من الجاذب، فستتجه النقاط الآتية إليه بسرعة أكبر.

قبل ذلك بسنوات، حين وصل ديفيد ريبال إلى مختبر «سيتي كوليدج»، حيث عمل غولوب وسويني في العام ١٩٧٤، تشارك الفيزيائيون الثلاثة في صنع الحلقة التي تصل النظرية بالتجربة.

بدت تلك الحلقة متينة فلسفياً، وجريئة رياضياً، لكنها غير بيّنة تقنياً. واشتغلوا في تلك الاسطوانات التي تولّد الاضطراب في السوائل. وقضى الثلاثة ذات غروب في نقاش طويل. ثم غادر سويني وغولوب في إجازة ليريا زوجتيهما اللتين أقامتا في كابينة غولوب الجبلية. لم يروا جاذباً غريباً. ولم يقيسوا ما الذي يحصل فعلياً عند اندلاع الاضطراب. لكنهم أيقنوا أن نظرية لانداو مخطئة. وحدسوا أن ديفيد ريبال على حق.

وكعنصر من عالم أظهره استعمال الكومبيوتر في التقصّي، ظهر الجاذب الغريب

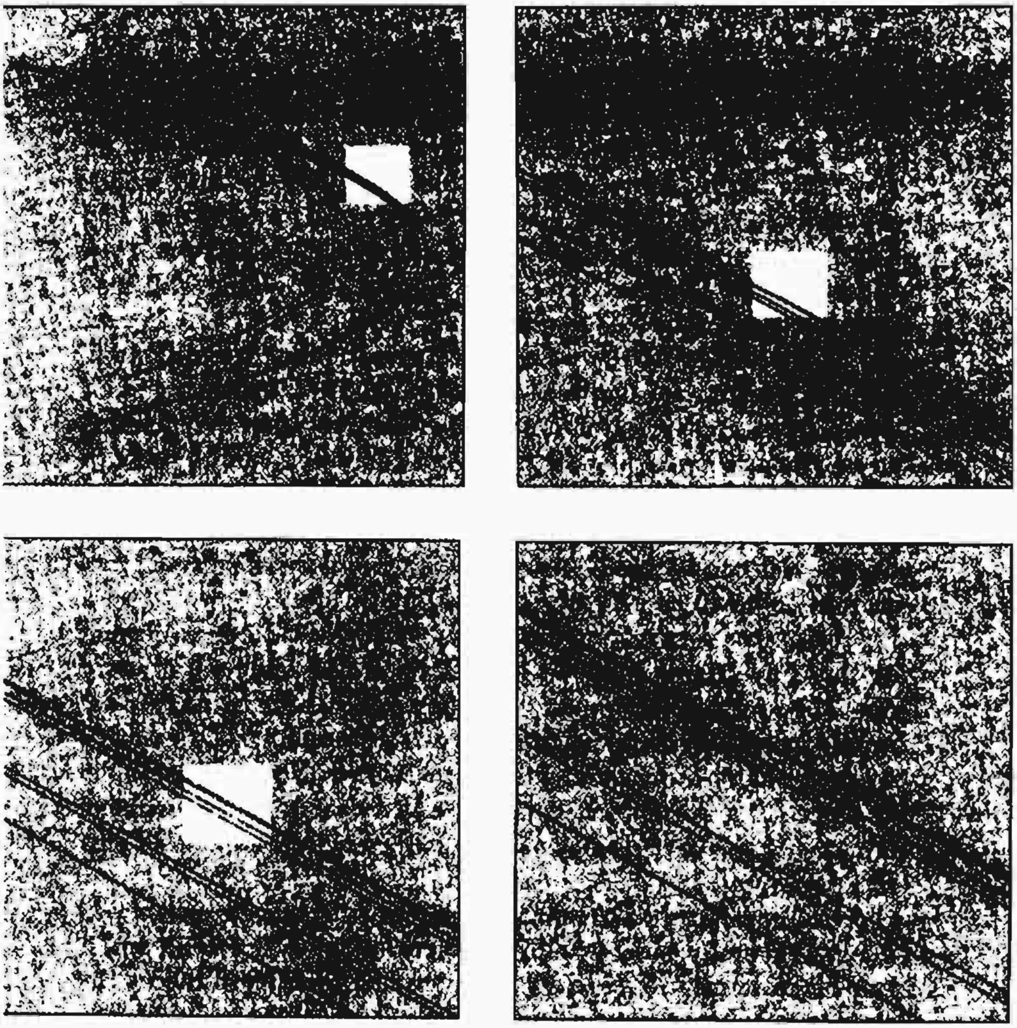
وكأنه استعصاء مستحيل. ودلّ إلى مكان فشلت مخيّلات كثيرة في القرن العشرين، في الوصول إليه. وسرعان ما مهر العلماء في استخدام الكومبيوتر. وسرعان ما أخذت صورة الجاذب الغريب في التشكّل، سواء في موسيقى التدفق المضطرب أو في الغيوم المتناثرة في الفضاء. لقد باتت الطبيعة مضغوطة. وُجدت قنوات لعبور اللاانتظام إلى أنساق تتشارك في ترسيمات مُعينة.

ولاحقاً، حفز الاعتراف علمياً بوجود الجاذب الغريب إلى تحفيز ثورة الكايوس، بإعطائها العلماء برنامجاً واضحاً للعمل عليه بصورة حسابية. وشرع الجميع في البحث عن الجاذب الغريب في كل مكان بدا أن الطبيعة تتصرف فيه بعشوائية.

واستطاع البعض أن يراكم ملايين المعلومات عن سوق الأسهم، ثم شرع في البحث عن الجاذب الغريب فيها. وحدقوا في عشوائية تلك الأرقام، باستخدام مُكبر اسمه الكومبيوتر.

عند منتصف سبعينات القرن العشرين، لم تكن تلك الاكتشافات قد أُدركت بعد. ولم ير أحد الجاذب الغريب تجريبياً. ولم يتوضح كيف يمكن رؤية الجاذب الغريب أصلاً. فمن الناحية النظرية، يستطيع الجاذب الغريب أن يُعطي مادة رياضية عن الصفات الأساسية لنظرية الفوضى. تتمثّل إحداها في الاعتماد الحسّاس على المُعطيات الأولية. ويُعتبر «المزج»، كما يحدث في محرك طائرة نفّاثة حيث يمتزج الوقود بالأوكسجين، منها أيضاً. ولم يعلم أحد سُبل قياس تلك الصفات ولا كمياتها. وبدت الجواذب الغريبة جزءاً من هندسة التكرار المُتغيّر، بمعنى أن أبعادها فراكتالية، لكن أحداً لا يعرف كيف السبيل لقياسها، ولا لتطبيق ذلك القياس في سياق المسائل الهندسية.

ولم يعلم أحد عن قدرة الجواذب الغريبة في المساعدة على حلّ أكثر المسائل عُمقاً في النُّظُم اللاخطيّة. فعلى خلاف النُّظُم الخطيّة، حيث يسهل الحساب والتصنيف، تبدو النُّظُم اللاخطيّة عصية على التصنيف، فكل منها مُغاير للآخر. ولقد شك العلماء مراراً في أنها تتشارك في صفات مُحدّدة، لكنهم لم يتوصلوا إلى حساب يستطيعون استخدامه في



جاذب هينو: بتكرار عمليات بسيطة من المطّ والطي، ظهر جاذب يسهل احتساب أرقامه، ولكن يصعب فهمه من قِبَل علماء الرياضيات. ظهرت ملايين النقاط، وشكلت معها ملامح الجاذب. ما ظهر بداية كخطوط مستقلة، تبيّن لاحقاً أنها تراكيب زوجية تحوي على تراكيب زوجية تحتوي على تراكيب زوجية وهكذا دواليك. ومع ذلك يصعب التنبؤ بمسار أي نقطتين متجاورتين.

رصد تلك الصفات وتصنيفها، فظلّت سمات النُّظُم متفرقة، وكل قائم بذاته. ويُبرهن جاذب لورنز مثلاً، وجود ثبات مُضمر في نظام يبدو بلا نسق ظاهرياً. ولم يعلم أحد كيف يُساعد جاذب كهذا الباحثين على تقصي نُظُم متفرقة. ولكن الهزّة التي أحدثها الجاذب الغريب، ذهبت إلى أمد أبعد من العلوم الصرفة. وقد أنست تلك الأشكال الغرائبية كثيراً من العلماء القواعد التقليدية للخطاب العلمي. وقد أشار ريبال مثلاً، إلى أنه لم يتكلم عن: «السحر الجمالي للجواذب الغريبة. إن تلك التجمعات من الخطوط المنحنية، وتلك الغيوم من النقاط المتناثرة، أوحت أحياناً الألعاب النارية وأحياناً المجرّات. لقد انفتح عالم يتطلب من يكتشفه، وتناغمات تبحث عمن يكتشفها».

النظرية الشاملة

«إن إعادة كتابة تلك الخطوط تصنع الذهب؛ إن رسم تلك الدوائر على الأرض يجلب الرياح المدوّمة والعواصف والبرق والرعد».

مارلو، دكتور فاوست

تنهمر المياه لبضعة أمتار من شلال، ويُعطي التيار المتدفق سلساً الانطباع في إمكان توقّع القطرة التالية. ثم تتسارع المياه وتنتثر. وتظهر تياراتها الصغيرة، كأنها مجموعة من أوردة متشابكة.

يقف ميتشل فايينبوم قرب التيار المتدفق، مرتدياً معطفاً رياضياً ومُدخّناً سيجارة. لقد سار طويلاً مع أصدقائه، لكنهم ذهبوا إلى أكثر البُرك هدوءاً عند منبع النهر. وفجأة، وبما يُشبه حركة رأس مشاهد في مباراة للتنس، يهزّ فايينبوم رأسه. «باستطاعتك التركيز على شيء ما. في إمكانك فجأة التقاط التركيب الكامل للسطح، وتُحسّ بذلك في أعماقك». وينفث المزيد من دخان سيجارته. «لكن أي عالم رياضيات ينظر إلى هذا المشهد، أو يراقب الغيوم المتراكمة أو يُشاهد بحراً في عاصفة، يعلم فوراً أنه لا يعلم شيئاً».

النظام في الفوضى. تبدو تلك الكليشيه قديمة جداً. تملك الفكرة القائلة بانسجام مُضمر في فوضى الكون، جاذبية ساحرة، ولطالما ألهمت أشباه العلماء والمشعوذين أيضاً. وعندما جاء فايينبوم إلى «المختبر الوطني (الأميركي) في لوس آلموس» عام ١٩٧٤، قبل أن يبلغ الثلاثين بسنة، أدرك أن علم الفيزياء يحتاج إلى أفكار قابلة للتطبيق، وإلى طُرق لتحويل الأفكار الحقّة إلى حسابات. ولم يعرف من أين يبدأ.

لقد وُظّف فايينبوم بناء على طلب بيتر كارروثرز، الاختصاصيّ في الفيزياء الذي قَدِم من «جامعة كورنيل» في العام ١٩٧٣، ليترأس قسم الأبحاث النظرية. وأول ما فعله كارروثرز كان صرف مجموعة من العلماء الأقدم سناً، واستقدم مجموعة من العلماء الشباب انتقاها بنفسه. وكمدير علمي، امتلك طموحاً قوياً، لكن الخبرة علّمته أن الانجاز العلمي يصنعه حُسن التخطيط. وبحسب كلماته: «إذا أنشأت لجنة في مختبر، أو في

واشنطن، وقلت لها إن الاضطراب يسُدّ علينا الطريق، وإنه يجب فهمه؛ فعندئذ يعطونك تمويلاً، وكومبيوتراً خارقاً. ثم تشرع في صنع برامج كبرى. لكنك لا تصل إلى أي شيء مُجد. بدلاً من ذلك، يمكنك اللجوء إلى فايينبوم الذي يجلس بهدوء، ويتحدث إلى الآخرين بهدوء، لكنه يتولى معظم العمل بنفسه». وشُغل الجميع بالحديث عن الاضطراب. ومع مرور الوقت، لم يعد كارروثرز نفسه يعرف في أي اتجاه يسير فايينبوم. «اعتقدت أنه يئس ووجد لنفسه مسألة أُخرى. ولم أعلم أن تلك المسألة الأخرى لم تكن سوى هي نفسها (الاضطراب). لقد كانت مُعضلة شُغل بحلّها علماء من مجالات كثيرة، لأن الكل عالق في مشكلة تلك النُّظُم اللاخطية الطابع.

ولم يعلم أحد أن الخلفية المناسبة لحل تلك المعضلة تتشكّل من معرفة جيدة بفيزياء الجُسيمات، ومعرفة الفيزياء الكمومية تشتمل على معرفة بتلك التراكيب التي تُسمّى «مجموعة إعادة التطبيع». وكذلك لم يعلم أحد ضرورة فهم النظرية العامة عن الاحتمالات، والبُنى التي تصنعها هندسة التكرار المُتغيّر. لقد امتلك فايينبوم الخلفية العلمية المُناسبة. وفعل الشيء المناسب في الوقت المُناسب. لم يتوسّل حلولاً جزئية. لقد حلّ المسألة برمتها».

جلب فايينبوم إلى «لوس آلموس» فكرة تقول إن العلم فشل في فهم المسائل الصعبة، أي تلك المتعلقة بالمسائل اللاخطيّة. وعلى الرغم من أنه لم يُنجز شيئاً مهماً كفيزيائي، فقد راكم خلفية علمية استثنائية. فقد امتلك معرفة عملية عن أكثر مسائل التحليل الرياضي تعقيداً، إضافة إلى أنواع جديدة من تقنيات الحوسبة التي تحدّت القدرات القصوى لغالبية العلماء. ونجح في طرد مجموعة من الأفكار الفيزيائية غير العلمية التي ترجع إلى الحقبة الرومانسية للقرن الثامن عشر.

أراد فايينبوم علماً جديداً. وشرع في إزاحة كل الأفكار عن التعقيد الحقيقي. وبدلاً منها، انصرف إلى محاولة حلّ أبسط المُعادلات اللاخطية.

ابتدأ مشوار فايينبوم مع ألغاز الكون عندما كان في الرابعة من العمر. فقد احتوت

غرفة الجلوس في المنزل العائلي في بروكلين على مذياع. ولطالما طارت مخيلة الطفل خلف الصوت الذي يأتي من اللامكان. وبصورة نسبية، بدا جهاز الأسطوانات (فونوغراف) مفهوماً أكثر، لأن الصوت يأتي من الأسطوانة التي تُرى بالعين. وقد عمل أبوه، المتخصص أصلاً في الكيمياء، في مرفأ نيويورك. وامتهنت أمه التدريس في المدارس العامة. وفي البداية، عزم فاينبوم على التخصص في الهندسة الكهربائية، التي نُظر إليها في حي بروكلين كمهنة تدرّ ذهباً. ثم أدرك أن ما أراد معرفته بخصوص الراديو، يقع في مجال الفيزياء. وينتمي فاينبوم إلى جيل من العلماء الذين صعدوا من طبقات اجتماعية أدنى، وشقّوا طريقهم أكاديمياً عبر الثانويات العامة، مثل ثانوية «صاموئيل تيلدن» في حال فاينبوم، ثم عبر الجامعات الرسمية.

إن عيش شخص عبقري في حي بروكلين الفقير، يتضمّن نوعاً من التأرجح بين عالمي العقل والواقع. ففي مطلع صباه، مال إلى الإكثار من مخالطة الناس ونسج الصداقات، التي حمته من رداءات كثيرة. وسرعان ما أدرك أنه ميّال للعلم، فأصبح أكثر بُعداً عن أصدقائه. ولم تعد المكالمات العادية تثير شغفاً في نفسه. في أحيان كثيرة، خصوصاً عندما أوشك أن يتخرّج في الجامعة، خطر له أنه لم يعش مراهقته، فعزم على استعادة علاقته مع العالم الواقعي. وأخذ يُكثر من الجلوس في الكافتيريا، ليُصغي بصمت إلى ثرثرات الآخرين عن أشياء مثل الحلاقة والطعام. وتدريجاً، عرف أن باستطاعته تعلّم الكثير من التحدث مع الآخرين.

وتخرّج في العام ١٩٦٤. ودخل «معهد ماساشوستس للتقنية»، حيث نال الدكتوراه في فيزياء الجُسيمات الأساسية في العام ١٩٧٠. طوال ٤ سنوات، انقطع للتدريس في جامعة كورنيل ثم في «معهد البوليتكنيك في فيرجينيا».

وقضت الأعراف الأكاديمية أن ينشر الأساتذة أوراقاً علمية على نحو منتظم، بالتعاون مع الطلبة. ولربما استُشير من زملائه أحياناً في مسائل مُعينة، فيرد بالقول: «حسناً، لقد فهمتها!» لم يكن ذلك أفضل ما يستطيعه عقل لامع مثل فاينبوم إنجازه. وسرعان ما جلبه

كارروثرز، وهو نفسه عقل لامع أيضاً، إلى «لوس آلموس» متيقّناً من أنه اكتشف موهبة علمية متألقة. والحق أن كارروثرز لم يسع خلف الموهبة، بل بحث عن العقول المُبدعة. وتذكّر مراراً تجربة كينيث ويلسون، الفيزيائي من كورنيل الذي يتحدّث بهدوء أيضاً، مثل فاينبوم، لكنه يبدو كمن لا ينتج شيئاً. وتمتّع بقدرة مُدهشة على سبر غور الفيزياء. وسرعان ُما ثار نقاش بشأن إمكاناته الفعلية كفيزيائي مُبدع. وراهن بعضهم أنه لن يُنجز شيئاً يُذكر. وفجأة، وكما يحدث الفيض، أنتج ويلسون مجموعة من الأبحاث الأصيلة في الفيزياء، ضمنت له نيل جائزة نوبل في العام ١٩٨٢.

وبالتعاون مع الفيزيائيين ليو كادانوف وميتشل فيشر، استطاع ويلسون أن يُحقق إسهاماً نظرياً أساسياً في فيزياء «الكايوس». فقد فكر الثلاثة، كل على طريقته، في الحال الانتقالية للمادة. وركزوا اهتمامهم على الأحداث التي تنقلها من حال إلى حال، مثل انتقال السائل إلى غاز أو تحوّل الحديد إلى مغناطيس. وباعتبارها حالاً متفردة تُقيم على الحدود بين أشكال المادة، تنحو المُعادلات الرياضية التي تصف الحال الانتقالية لأن تكون لاخطيّة. ولا يُساعد التبدّل السلس في المادة، قبل الحال الانتقالية، في فهمها. إن وعاءً من الماء يسخن بطريقة منتظمة حتى بلوغه حدّ الغليان والانتقال من حال المادة إلى حال البُخار. وفي الحال الانتقالية تلك، لا تتغير حرارة الماء، لكن تحصل ظواهر فائقة الاثارة في العلاقات بين سطح السائل والهواء.

وفي ستينات القرن العشرين، رأى كادانوف أن الحال الانتقالية تشكّل لغزاً للعقل. لنفكر في قطعة معدنية تتحوّل إلى مغناطيس. يقتضي الأمر أن يُعاد ارتصاف تركيب جزيئياتها كلها لكي تتخرّج من بنيتها العشوائية فتصبح منتظمة وتكتسب صفة المغناطيس. ويقتضي ذلك «اختيار» التوجّه الذي يصل إليه قطبا المغناطيس. يبدو ذلك «الخيار» حُرّاً، إذ يتعيّن على كل جزيء أن «يختار» التوجّه عينه الذي «تختاره» الجزيئيات الأُخرى كلها. فكيف يحدث ذلك؟ بطريقة ما، وبالمعنى المجازي، يتعيّن على كل ذرّة أن «تتواصل» مع البقية.

ومال كادانوف للقول إن الاتصال يمكن وصفه وكأنه نوع من المقياس. وتخيّل بنية المادة باعتبارها تتكوّن من صناديق، كل منها «يتواصل» مع جواره. ويبدو ذلك شبيهاً بالطريقة التي تتصل فيها الذرّة مع ما يُجاورها من ذرّات. وهنا يأتي دور المقياس. إذ تبدو أبسط طريقة لوصف المعدن هي باستخدام الأبعاد الفراكتالية، وتطبيقها على تلك الصناديق المتفاوتة الأحجام والمحتويات.

اقتضى الأمر كثيراً من التحليل الرياضي، ومن الخبرة مع النُظُم الفعلية، لإقامة البرهان على قوة المقياس كفكرة. وأحسّ كادانوف بأنه اصطنع عالماً بكراً من الجمال الذي يحتوي على نفسه بنفسه. يأتي جزء من الجمال من مفهوم الشمولية. وشكّلت فكرته الهيكل الأساسي لأحد أقوى ملامح عن الظواهر الحسّاسة، مثل غليان الماء والتحوّل إلى مغناطيس، والذي يقول إن تلك الحالات تتبع القوانين عينها.

ثم استطاع كينيث ويلسون أن يصوغ البُنية النظرية كاملة. وجعلها تحت شعار «مجموعة إعادة التطبيع»، مما أعطى طريقة قوية للتوصّل إلى حسابات حقيقية عن أشياء حقيقية أيضاً. دخل مفهوم «إعادة التطبيع» إلى الفيزياء في أربعينات القرن العشرين، كجزء من النظرية الكمومية التي أتاحت احتساب تبادلات الطاقة بين الإلكترونات والفوتونات. وظهرت مشكلة في تلك الحسابات، كما الحال مع الحسابات الأخرى التي خشيها ويلسون وكادانوف. إذ تبيّن أن بعض تلك العناصر يتطلّب أن تحتسب باعتبارها كميات لا متناهية، وهذا ما يُربك الحسابات كلها. ولكي يصبح النظام طبيعياً اضطّر ريتشارد فاينمان، جوليان شونيغر، فريمان ديسان وآخرون إلى إسقاط تلك الكميات اللامتناهية من حساباتهم.

وفي ستينات القرن العشرين، تأمل ويلسون في أسباب النجاح الذي حققه مفهوم إعادة التطبيع. ومثل كادانوف، فكر في أن الأمر يرجع إلى اتّباع مبادئ المقاييس. فقد افترضت بعض الكميات، مثل وزن الجُسيم، ثابتة، لأن التجربة اليومية مع المادة تشير إلى عدم تغيّر الوزن. ونجحت طريقة إعادة التطبيع لأنها تصرّفت على أساس أن كمية مثل

الوزن يجب عدم إهمالها. ولوحظ أن تلك الكميات تسير صعوداً وهبوطاً عبر المقياس الذي يتعامل معها. وبدا الأمر غرائبياً. ومع ذلك فإنه يتطابق مع ما فكر فيه بنواه ماندلبروت بالنسبة لطول الشواطئ الإنكليزية؛ التي لا يمكن احتسابها من دون أخذ المقياس في الاعتبار.

يصنع المقياس الفارق النسبي في الحساب الذي يُجريه المراقب، فالمقياس الذي ينطبق على من يراقب من الأقمار الاصطناعية هو غير الذي ينطبق على مراقب يسير على الساحل. وتماماً كما لاحظ ماندلبروت، فان الفارق عبر المقاييس ليس اعتباطياً، بل يتّبع قوانين. وتعني الفروق في احتساب معيار الكتلة أو الطول، ان ثمة شيئاً ما لا يتغيّر، وأن له مقداراً كمياً مُحدداً. وفي حال هندسة التكرار المُتغيّر (فراكتال)، فإن الأبعاد الفراكتالية تُمثّل الشيء الذي لا يتغيّر عبر المقاييس. ويمكن احتسابها، كما أنها تستخدم أداة في الحسابات. وبالسماح للكتلة بالتغيّر عبر المقاييس، استطاع علماء الرياضيات أن يلاحظوا التشابه عبر المقاييس أيضاً.

إذاً، فبالنسبة إلى الحسابات الصعبة، أعطت نظرية «مجموعة إعادة التطبيع» التي ابتكرها ويلسون، درباً أُخرى لحل أكثر المشكلات تعقيداً. فقبلها، لم يكن من طريقة لحل المُعادلات اللاخطيّة سوى «نظرية الاهتزاز». فلكي يُصبح الحساب عملياً، يمكن الافتراض أن مسألة لاخطيّة معينة لا حل لها تُشبه مسألة خطيّة أُخرى قابلة للحل.

ويُنظر إلى ذلك باعتباره شيئاً قليلاً من الاهتزاز. ثم تُحلّ المسألة الخطيّة. وتنقل أرقام حلولها إلى ما يُعرف باسم «رسم فاينمان البياني». وكلما قُصد الوصول إلى حل أكثر دقة، استعمل رسم أكثر دقّة. وبقليل من التجربة والخطأ والمصادفة، يمكن الرسوم أن تتآلف لتصنع حلاً. وبالتجربة، ثَبُتَ أن المصادفة تصبح أقل، كلما زاد تعقيد المسألة وإثارتها. ووجد فايينبوم نفسه، مثل معظم جيل الشباب من علماء فيزياء الجُسيمات في ستينات القرن العشرين، يستعمل «رسم فاينمان البياني» بكثرة. وولّد الأمر اقتناعاً لديه بأن «نظرية

الاهتزاز» مُملّة ومُضنية وبعيدة عن روح الابتكار وغبية. ولذا، تبنّى بسرعة «مجموعة إعادة التطبيع» التي صنعها ويلسون. فلأنها أقرّت بالتشابه، استطاعت أن تُزيل إحدى طبقات التعقيد في كل مرّة تستعمل فيها.

وعملياً، لم تكن «مجموعة إعادة التطبيع» معصومة من الخطأ. وتطلّبت الكثير من النباهة في اختيار الحساب المناسب بحيث يُعبّر عن التشابه. وقرر فايينبوم استعمالها في حلّ مسألة الاضطراب، خصوصاً أن ثمة علاقات قوية بين الاضطراب والتشابه الذاتي، حيث التدويم يلي التدويم، والتقلّب يتبع التقلّب.

ولكن، ماذا عن بداية الاضطراب؟ ماذا عن تلك اللحظة الغامضة التي تتحوّل فيها الأشياء المنتظمة إلى فوضى؟ لم يتوافر دليل على قدرة حساب «مجموعة إعادة التطبيع» على التعامل مع ذلك الانتقال. لم يتوافر دليل، مثلاً، على أن الانتقال يتبع قوانين المقاييس.

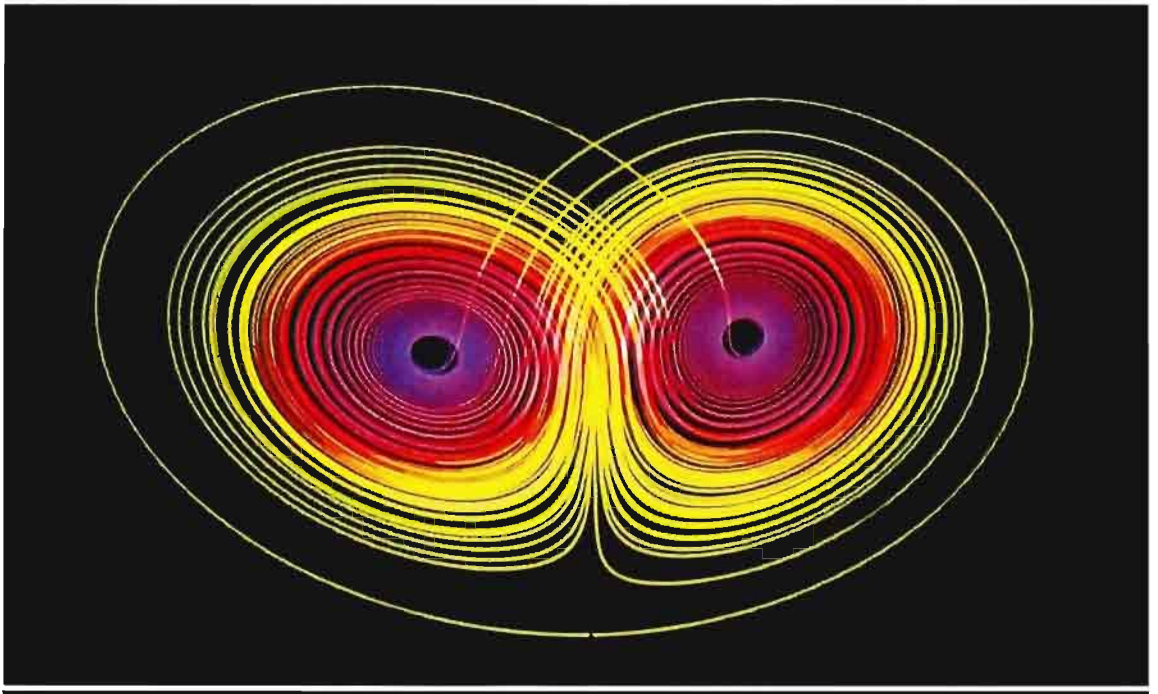
في أيام دراسته الجامعية في «معهد ماساشوستس للتقنية»، تعرض فايينبوم لتجربة أثّرت فيه مدة طويلة. إذ تنزّه ذات يوم، مع بعض أصدقائه، قرب «سدّ لنكولن» في بوسطن. فقد اعتاد حينذاك أن يسير أكثر من أربع ساعات يومياً، ليُقلّب الأفكار التي تجوب رأسه. لكن، في ذلك اليوم بالتحديد، انفصل عن المجموعة، ليسير منفرداً. ومرّ بمجموعة من المتنزهين وتجاوزهم. وتابع التلفّت وراءه، صاغياً للضجة التي تصدر من المجموعة، ومُراقباً أيديهم التي تمتد تكراراً لتلتقط الطعام. وفجأة، أحسّ بأن المشهد تجاوز حدّاً ما، فبات غير مفهوم. لقد صارت الشخوص صغيرة، ولم تعد حركتها مفهومة. وتحوّلت الأصوات إلى ضجة بلا معنى. استدعت ذاكرة فايينبوم وصف الموسيقار الألماني غوستاف ماهلر للشيء الذي حاول التعبير عنه في الحركة الثالثة من سمفونيته الثانية. الحركة المستمرة والحراك غير المفهوم للحياة... مثل تراقص في قاعة رقص مُضاءة ببراعة؛ يتخيّل لعينيك من بُعدٍ، فيما أنت في قلب الليل ومن مسافة لا يُسمع منها صوت الموسيقى.

تلك كانت الكلمات التي استعملها ماهلر والتمعت في ذهن فايينبوم الذي درج على سماع مؤلفات ذلك الموسيقار وقراءة كتب الشاعر الألماني غوته، مما قذف به إلى قلب الذائقة الرومانسية. وتأثر بقوة بكتاب فاوست لغوته، فتغلغلت في ذهن فايينبوم أفكار هذا الفيلسوف التي تمزج العاطفية العالية بالتفكير العقلاني. ومن دون ذلك الميل الرومانسي، كان صعباً أن يلتقط ذلك الإحساس الذي دهمه عند «سدّ لنكولن». وشرع في تأمل الفكرة الآتية: لماذا تفقد الظواهر معناها عندما تُضحي بعيدة؟ لا تُعطي قوانين الفيزياء تفسيراً كافياً لهذه الظاهرة. وفي المقابل، فكّر أيضاً أن العلاقة بين التقلّص وفقدان المعنى ليست بالوضوح الكافي. فلماذا تُضحي الأشياء غير مفهومة عندما تتقلّص وتصغر؟

وجرّب تحليل تلك التجربة باستعمال أدوات التحليل المستقاة من الفيزياء النظرية، سائلاً عن رأي الفيزياء أيضاً في ميكانيزم تكوّن الأحاسيس في الدماغ! أنت ترى تفاعلاً إنسانياً وتستخلص معنى ما منه. لكن الأحاسيس تتلقى كميات وافرة من المعلومات، فكيف تُنخلها أدوات الحس في الدماغ لتجرّد دلالالتها؟

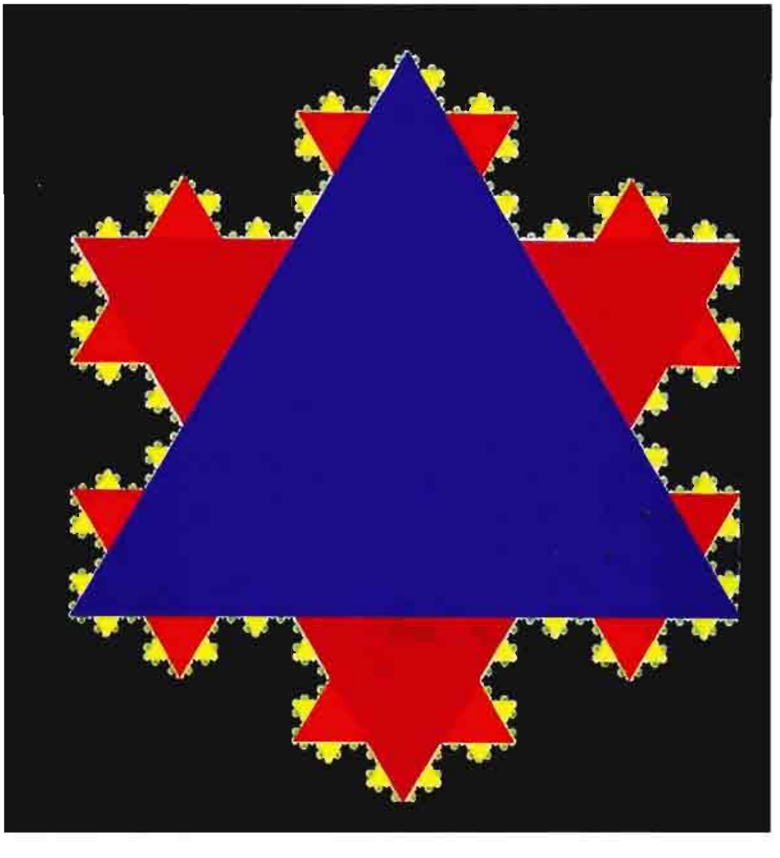
من الواضح، على الأرجح، أن الدماغ لا يملك نُسخاً جاهزة عن أشياء العالم. لا يوجد مكتبة من الأشكال والأفكار للرجوع إليها ومقارنتها بالصور التي تتولد من الأحاسيس. تُخزّن المعلومات في الدماغ بطريقة مرنة وفنّية، مما يسمح بالتلاعب بها بطريقة فانتازية وبإعادة تشكيلها في الخيال. ثمة الكثير من الفوضى في تلك العمليات. ولربما امتلك الدماغ مرونة أكبر بكثير مما تحوزه الفيزياء التقليدية، ولذا استطاع أن يعثر على الكثير من النظام في تلك الفوضى الهائلة التي تضج في جنباته!

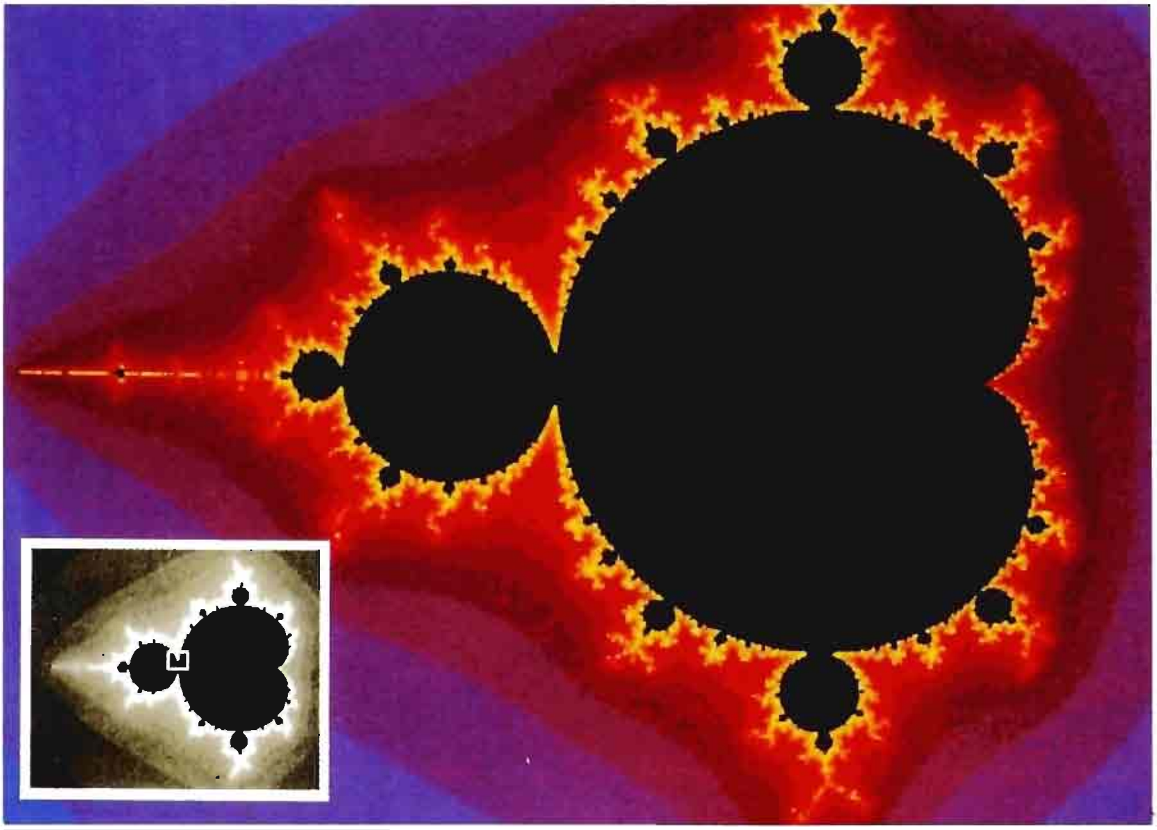
وفي الوقت عينه، فكّر فايينبوم في الألوان. ويحفظ تاريخ العلم تلك المناوشة التي دارت في القرن التاسع عشر بين أتباع مدرسة نيوتن في إنكلترا وأنصار غوته في ألمانيا، عن طبيعة اللون. فبالنسبة لقوانين نيوتن، بدت أفكار غوته مُضلّلة علمياً لأن الأخير رفض النظر إلى اللون باعتباره صفة ساكنة وثابتة، بحيث تُقاس بواسطة آلة تحليل الطيف (المِطياف). وصَمّم غوته على القول إن اللون مجرد انطباع حسي.



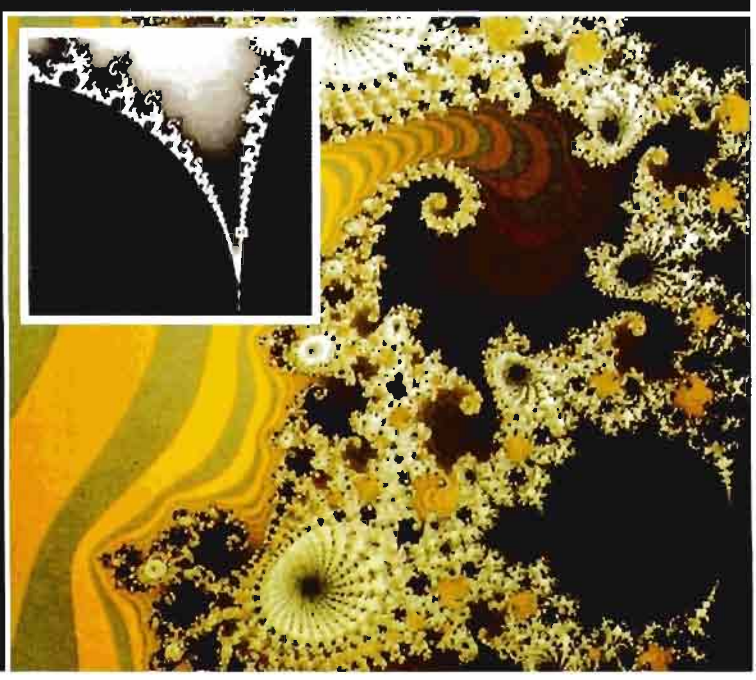
جاذب لورنز

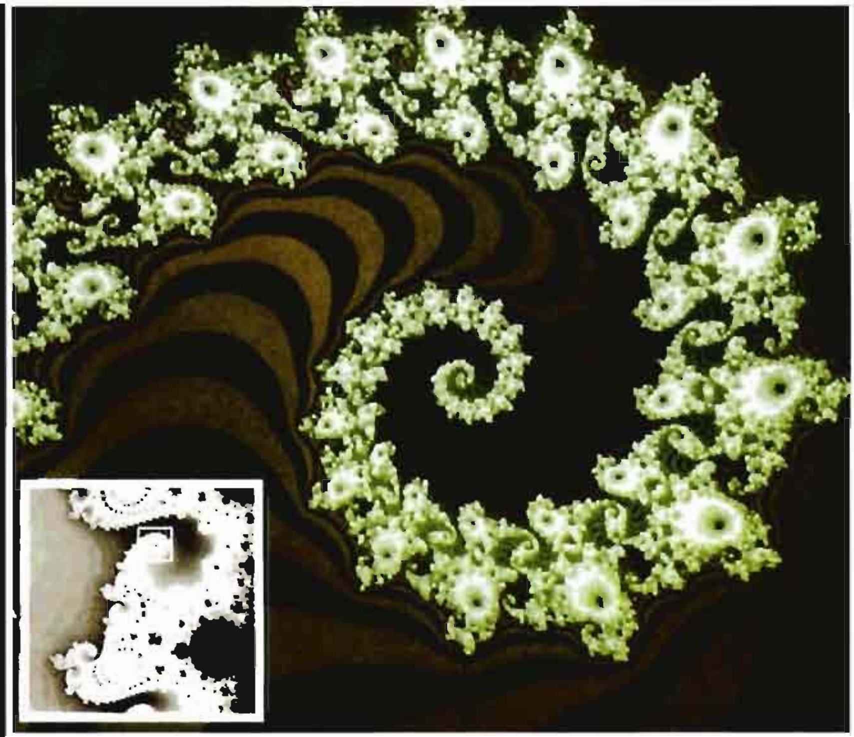
منحنی کوخ

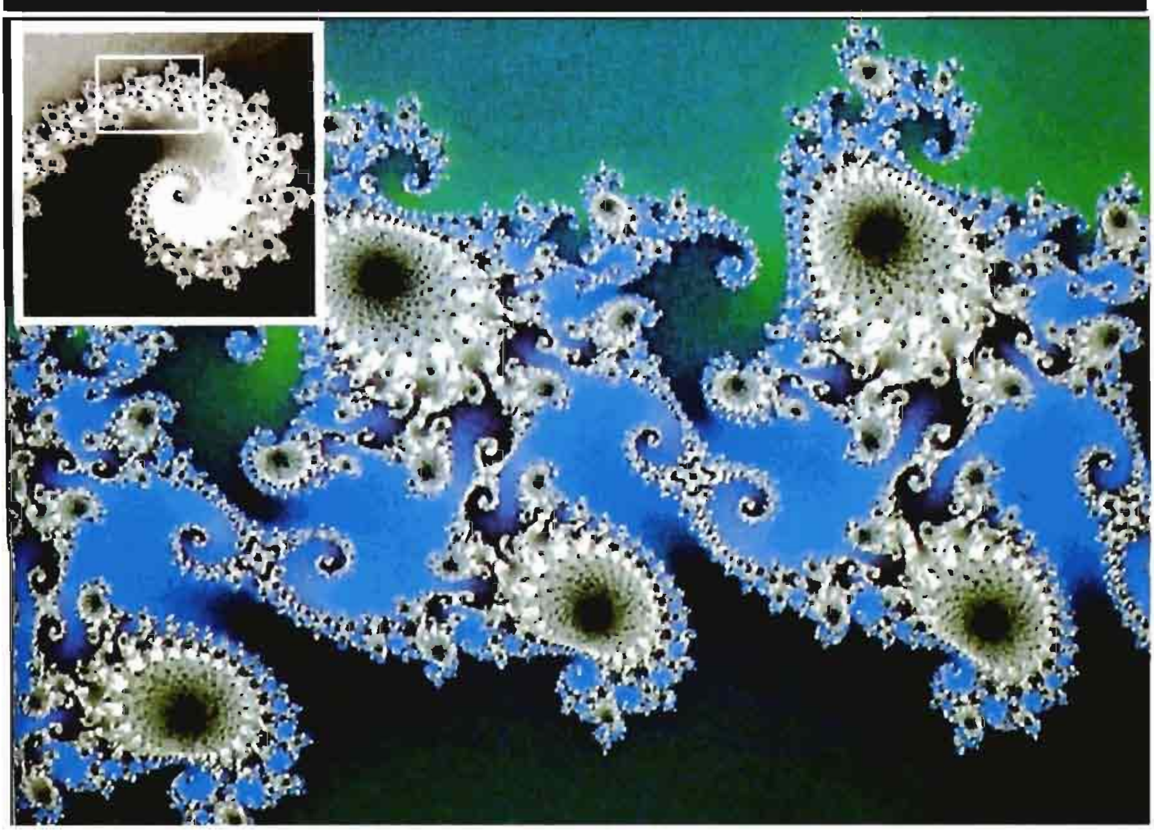


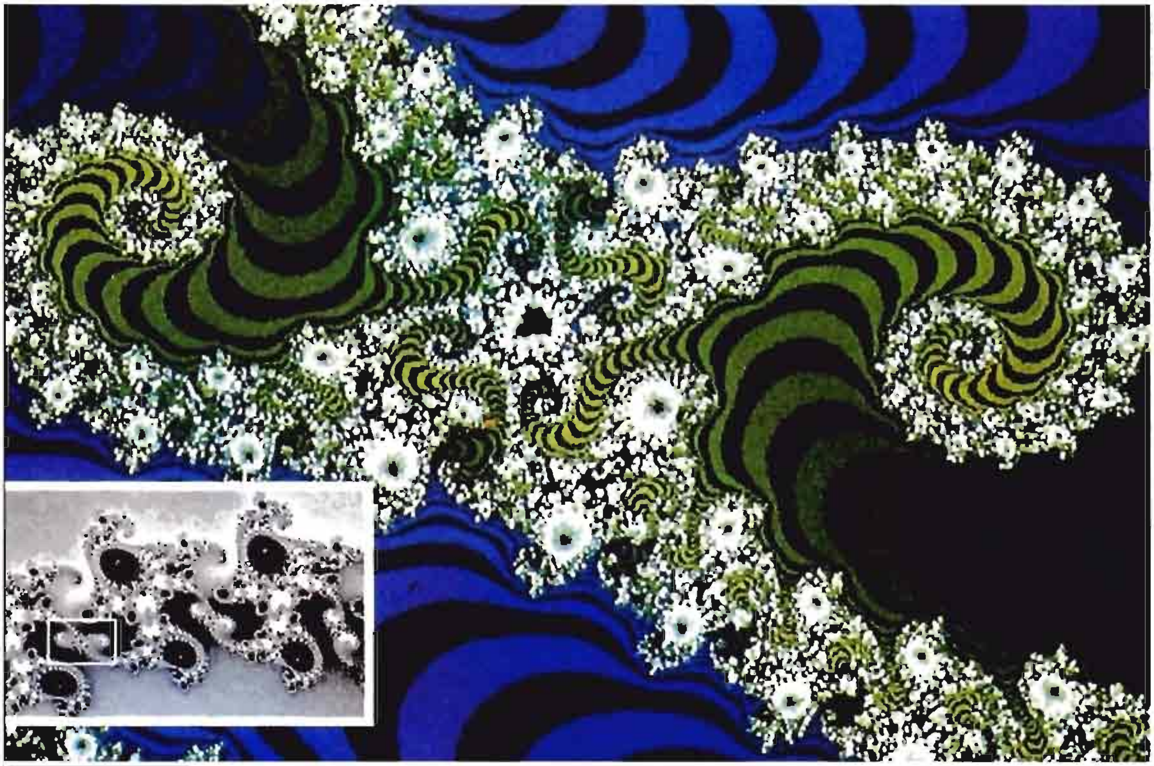


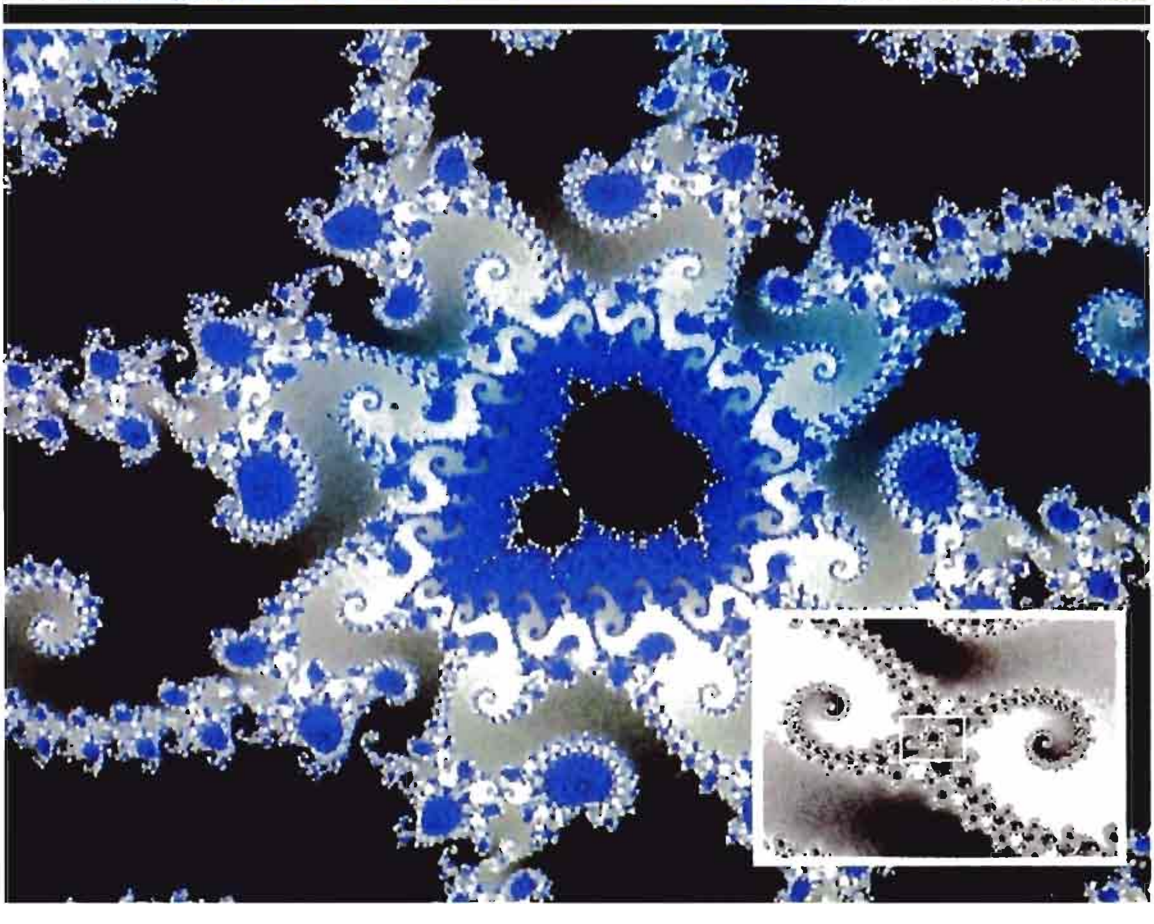
مجموعة ماندلبروت. إن رحلة عبر المقاييس المتتالية الصغر تُظهر التعقيد المتزايد للمجموعة، التي تتميز بأشكال تُشبه ذيل الحصان الطويل، وبمجموعات صغيرة تُشبه المجموعة كلها. ويُظهر الرسم الأخير تلك المجموعة مع تكبير مقداره واحد من المليون.









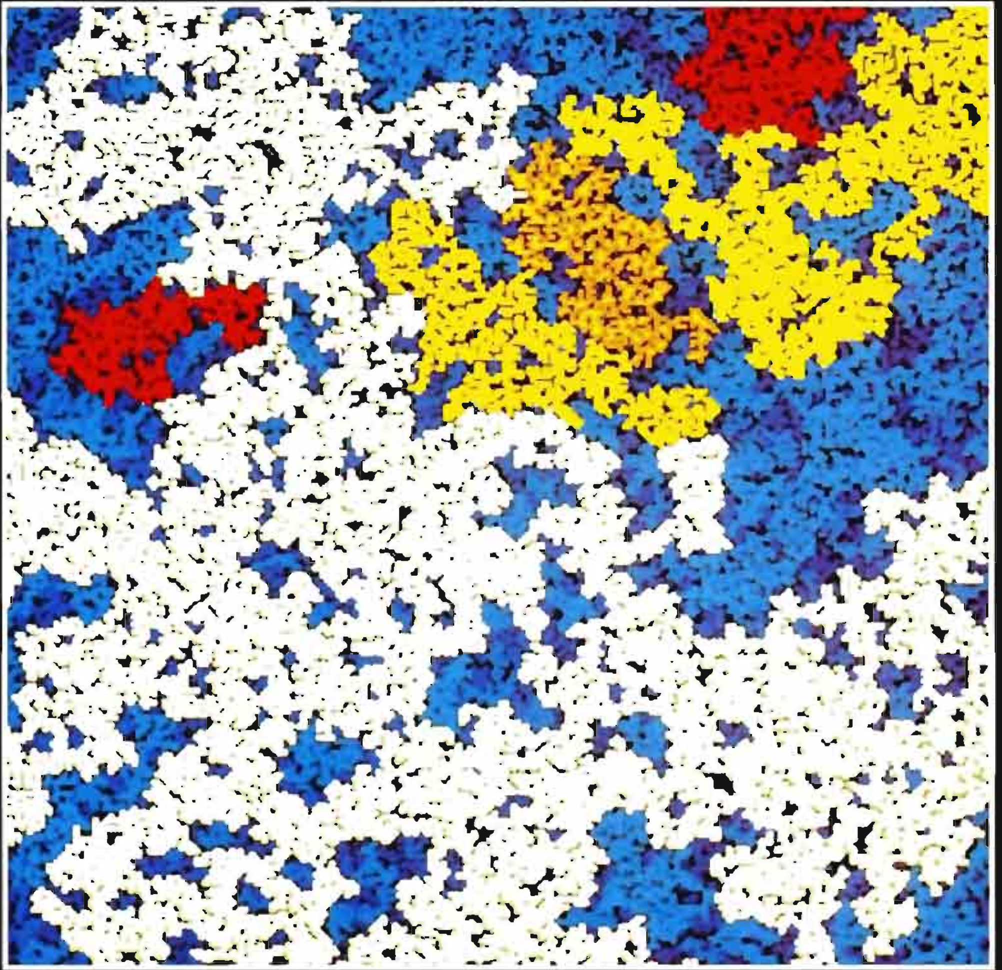




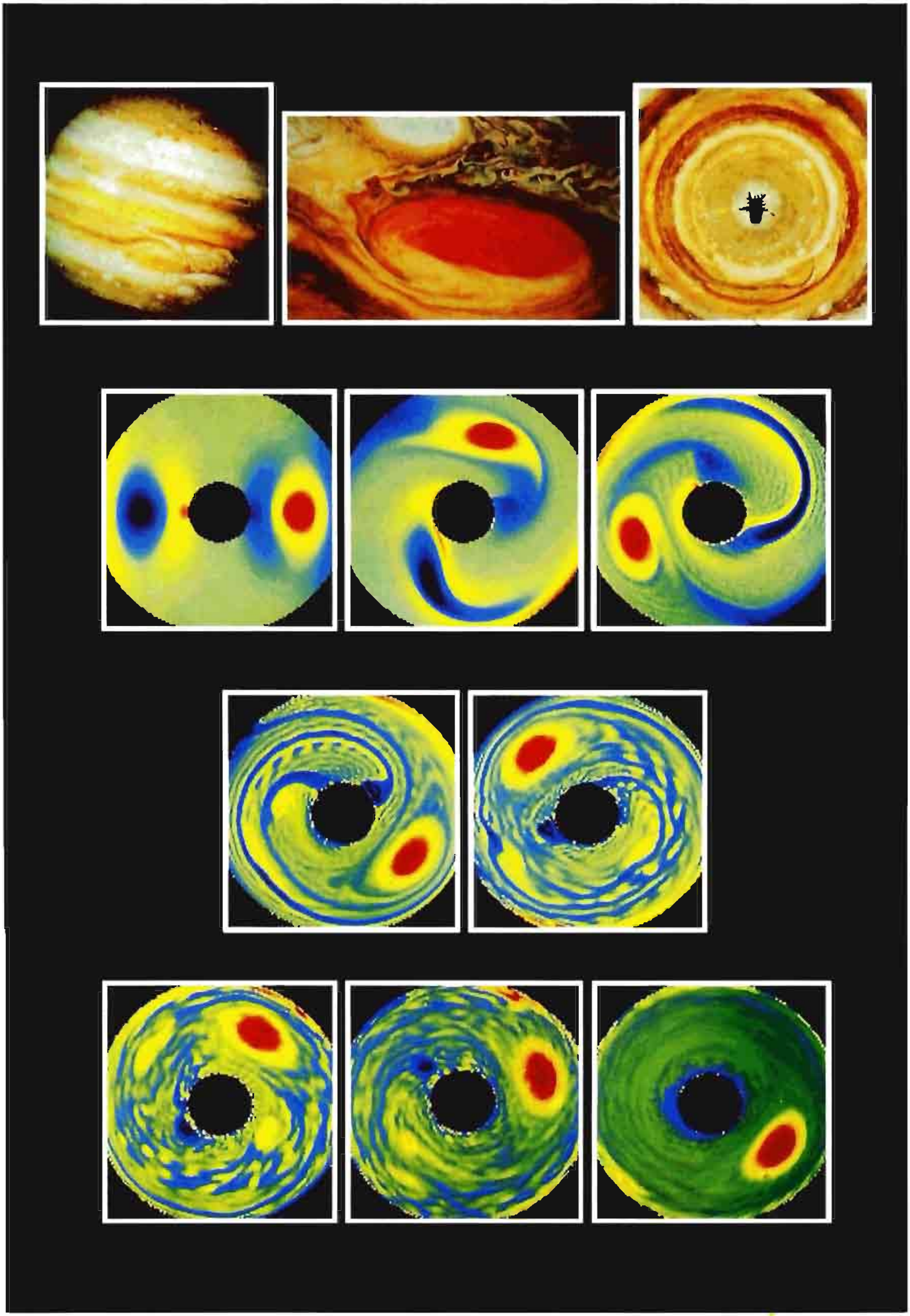


الحدود المُعقّدة لطريقة نيوتن. تؤدي قوة الجذب في ٤ نقاط (النقاط السوداء) إلى صنع «حوض من الجذب»، كل له حدوده المُعقّدة. وتُظهر الصورة أن استعمال «طريقة نيوتن» لحل المُعادلات، يقود من أي نقطة بداية إلى واحد من أربعة حلول ممكنة.

البقعة الحمراء الكبيرة: أظهرت سفينة الفضاء أن سطح المُشتري يشبه سائلاً مُضطرباً، مع حزم من التدفق تتجه غرباً. وتظهر البقعة الحمراء عند النظر إلى خط استواء الكوكب، كما عند النظر إلى قطبه الجنوبي. ومكنت الرسوم البيانية للكومبيوتر، وباستعمال مُحاكاة ماركوس، من تقليد المنظر عبر القطب الجنوبي. ويظهر اللون اتجاه التدويم بالنسبة لأجزاء من السائل. وتظهر الأجزاء التي تتحرك بعكس عقارب الساعة بلون أحمر، والتي تسير مع عقارب الساعة بلون أزرق. وبغض النظر عن نقطة البداية، تنحو الحُزم الزرق للتكسّر، فيما تندمج القطع الحُمر لتصنع بقعة كبيرة ثابتة ومنسجمة تقف في بحر من الاضطراب.



التجمعات التكرارية المُتغيّرة: باستخدام الكومبيوتر، رُسمت مجموعات من الجُسيمات لترسم "شبكة التقطير"، وهي أحد النماذج البصرية التي صنعت بهندسة الفراكتال. وعندما طُبّقت على الفيزياء، تبيّن أنها تُقلّد عمليات مختلفة مثل تكوّن اللدائن ورشح البترول عبر الصخور في باطن الأرض.



وصاغ غوته وجهة نظره بالكلمات الآتية: «عبر رقص الضياء ورقصاته المُضادة... تتذبذب الطبيعة ضمن حدودها المُقرّرة... هكذا تُصنع الظواهر التي تظهر للإنسان عبر الوقت والزمن». وفي المقابل، تُعتبر التجربة الشهيرة لنيوتن مع الموشور الزجاجي، أحد أحجار الزاوية في نظرياته عن الكون. وفي تلك التجربة، راقب نيوتن مرور ضوء الشمس الأبيض فُي موشور زجاج، وكيف أنه يتفرق إلى مجموعة من ألوان الطيف. ثم وضع عدسة قرب الموشور، عند جهة خروج الضوء، فأعاد تجميع الألوان المتفرقة، حتى شكّلت لون ضوء الشمس الأبيض ثانية. واستنتج نيوتن أن الضوء يتألف من مزيج من ألوان أساسية (ألوان الطيف)، واقترح أن لكل لون موجة خاصة به. وتخيّل أن الألوان تصنع نتيجة اهتزاز جُسيمات مُعينة بحيث يلائم كل لون سرعة اهتزاز جسيم معين. ولم تتوافر لدى نيوتن دلائل كافية عن نظريته اللامعة. إذاً، فما هو اللون الأحمر مثلاً؟ بالنسبة إلى فيزياء الضوء عند نيوتن، إنه حزم الضوء التي تملك موجات بتردد مُحدد. وسرعان ما استطاع أنصار نيوتن مراكمة أدلة كثيرة للبرهان على تلك النظرية؛ فيما ذوت نظرية غوته تدريجاً.

وعاد فايينبوم إلى التفكير فيها. وبحث عنها في مكتبات جامعة هارفرد. واكتشف أن غوته أجرى سلسلة من التجارب عن الضوء، مُبتدئاً، مثل «خصمه» نيوتن، بالموشور الزجاجي. وبدل مراقبة مرور الضوء عبره، رفع غوته الموشور أمام عينيه. ولم ير لا ألوان الطيف ولا قوس قزح ولا أي لون.

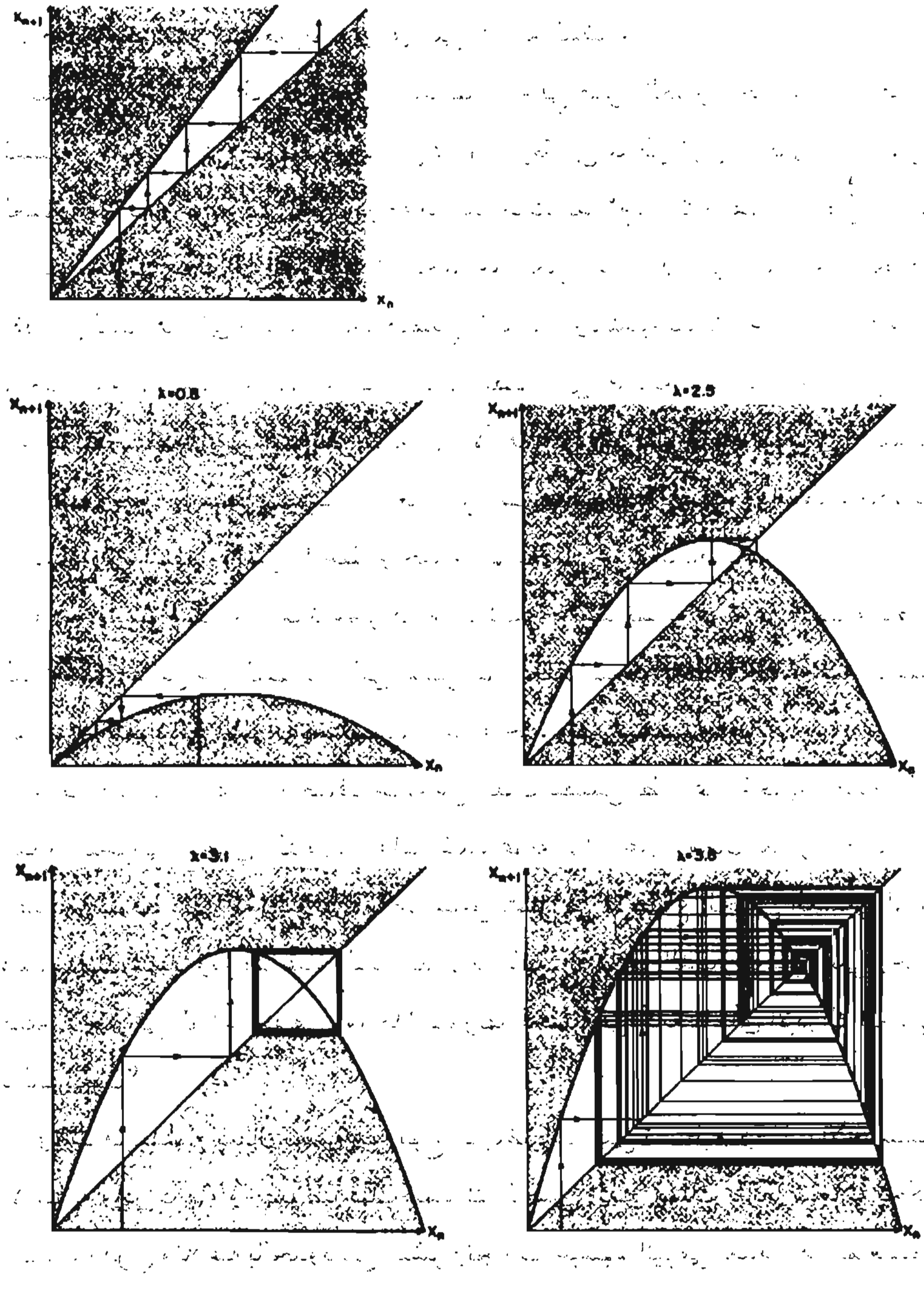
وسواء وجَّهَه إلى السماء الصافية أو إلى حائط أبيض صاف، فإن الموشور لم يُعط لوناً، بل أعطى دوماً الشيء عينه: الانسجام.

ولكن، إذا عبرت السماء غيمة أو لطّخت بقعة الحائط الأبيض، فإن الموشور يفيض بالألوان. واستنتج غوته أن اللون هو «تبادل بين الضوء والظل». وجرّب غوته تقصّي الطريقة التي يرى فيها الناس الظلال التي يصنعها مصدر قوي للضوء. واستعمل شموعاً وأقلام رصاص، مرايا وزجاجاً مُلوّناً، نور الشمس وضوء القمر، بلورات وسوائل

عدسة مكبّرة على الكابوس: مُعادلة بسيطة تتكرر المرة تلو المرة. استعمل فايينبوم مُعادلة مُباشرة، وطبقها بحيث يدخل رقماً إليها ويعطي نتيجة معينة فتعود لتدخل إلى المعادلة نفسها ولكن باعتبارها الرقم التالي الذي يدخل المُعادلة وهكذا دواليك. وتفيد، مثلاً، في توقع عدد مجموعة حيوانية سنوياً. ولكي يُعبّر صورياً عن هذا النظام من المُعادلات، يصنع رسماً بيانياً، بحيث يرسم القيم المُدخلة إلى المُعادلة على المحور الأفقي وتظهر النتيجة على المحور العمودي. وكل قيمة على المحور الأفقي تقابلها قيمة على المحور العمودي. وهكذا يُرتسم منحنى بياني. ولتمثيل السلوك البعيد المدى للنظام، رسم فايينبوم مساراً انطلاقاً من نقطة اعتباطية على المحور الأفقي، بحيث تكون القيمة المقابلة لها على المحور العمودي، هي القيمة التي تُستعمل في وضع النقطة التالية على المحور الأفقي. ولاحظ أن المسار يتجاوز الخط المائل بزاوية ٤٥ درجة الذي تتساوى عنده قيم الخطين الأفقي والعمودي. وبالنسبة إلى علماء الأيكولوجيا، فإن الخط البياني الأبسط هو الذي يتبنى نظرية مالتوس عن تكاثر متواصل ومُتصاعد باطراد للسكان. (الرسم إلى اليسار). وترسم أكثر المُعادلات واقعية عن التزايد السُّكاني قوساً، مما يعيد عدد السكان إلى الانخفاض، إذا ارتفع بصورة كبيرة. ويظهر ذلك القوس كنموذج عن «الخريطة اللوجستية»، التي تتخذ شكل قطع مُكافئ كامل في المقابل، اكتشف فايينبوم أن نوع القوس ليس مُهماً، ذلك أن تفاصيل المُعادلة لم تعد شيئاً أساسياً، لأن الأساسي هو أن تُضمر المُعادلة نوعاً من «الاحديداب».

ويعتمد سلوك النظام بشكل حسّاس على درجة التقوس، ودرجة اللاخطية في مساره، أو ما سماه روبرت ماي «الازدهار والانكماش». عندما تكون المُعادلة سطحية، تسير المجموعة إلى فناء. وتؤدي زيادة التحدب إلى توازن من النوع التقليدي الذي يألفه علماء الأيكولوجيا، وتشدُّ تلك النقطة المسارات كلها اليها، فتُصبح نوعاً من «جاذب» له بُعد وحيد. وعندما يتخطى النظام نقطة مُعينة، يظهر تفرّع نتيجة تذبذب عدد السكان عن الدورة الثانية. ويلي ذلك المزيد من تضاعف الدورات. وفي النهاية، (في أسفل اليمين) يرفض المسار أي نوع من الاستقرار.

شكّلت مثل هذه الصور نقطة انطلاق لعمل فايينبوم، عندما حاول أن يستنبط نظرية. ثم شرع في التفكير بالتكرار: مُعادلات للمُعادلات، ثم مُعادلات للمُعادلات وهكذا دواليك. ويترافق ذلك مع ظهور تحدّب يليه تحدّب يليه تحدّب.


Xn+1
Xn
λ=0.8
λ=2.5
λ=3.1
λ=3.8

ودواليب الألوان. ومثلاً، أضاء شمعة أمام ورقة بيضاء عند الغسق، ووضع بينهما قلم رصاص. ورمى نور الشمعة بلون أزرق على الورقة البيضاء.

لماذا؟ لقد بدا لون الورقة أبيض عندما نُظر اليه في ضوء الغسق وحده، أو في ضوء الشمعة وحدها. ولكن ظل قلم الرصاص قسّم الورقة إلى مناطق زُرق وأُخرى بلون ضوء الغسق. وأُستنتج غوته أن: «اللون درجة من تدرجات الظلام... تتحالف مع الظل». وإذا حُوّلت تجارب غوته إلى لُغة الفيزياء الحديثة، يمكن القول إن اللون يأتي من الحدود القصوى للظواهر، أي ما يُشار إليه بمصطلح «التفرّد». وبالنسبة لفايينبوم، بدا نيوتن ميّالاً للاختزال، وغوته ميّالاً للشمولية. كسّر نيوتن الضوء إلى أقسامه الأساسية ليعثر على أكثر التفسيرات بساطة للّون. فيما نظر غوته إلى الأزهار، ودرس اللوحات، سعياً وراء تفسير أكثر شمولية. واستطاع نيوتن أن يُعبر عن نظريته فيزيائياً للضوء بواسطة مُعادلات رياضية. وفي المقابل، لسوء الحظ أو حسنه، لم يُحسن غوته الرياضيات.

وأقنع فايينبوم نفسه أن غوته مُحقّ في شأن الضوء. تُشبه نظرية غوته عن الضوء النظرة الشائعة بين الناس عن السهولة، التي تفصل بين العلم المُجدّ وانطباع الناس عنه. يسهل القول إن النظرة إلى الألوان تختلف بين زمن وآخر، وبين شخص وآخر.

ولكن فايينبوم رأى أن أوصاف غوته عن اللون تتضمن نظرة علمية قوية، إضافة إلى الطابع التجريبي الجريء لتجاربه. ولقد شدّد غوته مراراً على إمكان تكرار تجاربه عن الضوء واللون، ذلك أنه اقتنع بأن ما هو شامل يتمثّل في الانطباع الحسي المُسمّى لوناً، ذلك ما كان شاملاً وموضوعياً، وليس اللون في ذاته. إذ ما هو الدليل العلمي على وجود صفة الأحمر في العالم الحقيقي، ما خلا صورتها الحسيّة في أدمغتنا، أي الإدراك الحسّي بذلك اللون؟

وبات فايينبوم يسأل نفسه عن نوع الرياضيات التي تستطيع وصف الأحاسيس الانسانية وإدراكاتها، وخصوصاً ذلك المُدرك الحسّي الذي يملك طابعاً شاملاً، بحكم انتشاره القوي وتلاعبه بالحدود بين البشر وتجارب عيشهم اليومي بعناصرها المتعددة؟

لا يُمثّل الأحمر بالضرورة موجة ذات تردد مُعيّن، كما تُفسره فيزياء نيوتن. ويملك منطقة تضمّ كوناً من الفوضى، ولا يسهل وصف حدود تلك المنطقة. وعلى الرغم من ذلك تجد أدمغتنا اللون الأحمر بطريقة منتظمة وبانسجام متين ومُثبت.

على ذلك النحو، راح فايينبوم يُفكر في شبابه. وتبدو تلك الأفكار بعيدة عن تدفق السوائل واضطرابها. والحق أن فهم الطريقة التي يفكر فيها الدماغ، عبر بحر من المُدركات الحسية الفوضوية، يتطلب فهماً للطريقة التي تستعملها الفوضى لتبلغ حدّ الشمولية.

وعندما شرع فايينبوم يفكر في الظواهر اللاخطيّة، أحس أن تعليمه لن يفيده بشيء. فلم يكن مستطاعاً استنباط حلٍّ لنظام من المُعادلات التفاضلية اللاخطيّة، ما عدا الأمثلة القليلة التي تحتوي عليها مراجع أكاديمية عديدة. ولم يرُقه أيضاً حلّ تلك المُعادلات باعتماد «نظرية الاهتزاز» التي ترتكز على تقريبات متلاحقة في الوصول إلى حل للمعادلات اللاخطيّة، مع الاعتماد جزئياً على عنصر المصادفة أيضاً. وتعمق في دراسة التدفق اللاخطّي والتذبذب، فاستنتج أنها ظواهر غير مُعرّفة بدقة. وبالاعتماد على الورقة والقلم، قرر فايينبوم البدء من معادلة تشبه تلك التي درسها روبرت ماي في سياق بيولوجيا السكان.

إذاً، ابتدأ عمل فايينبوم من المُعادلة التي يستعملها طلاب المرحلة الثانوية في رسم المُنحنى المعروف باسم «القطع المُكافئ»، ويُشبه المظلة. ويُعبر عن علاقة غير طردية بين رقمين، بمعنى أنها تمرّ بمجموعة من التقلّبات. فمثلاً، إذا كان عدد السكان لهذا العام قليلاً، فإن عددهم السنة المقبلة سيكون قليلاً أيضاً. ولكن شكل المظلة فيه ارتفاع وذروة وانخفاض. فيرتفع عدد السكان ثم يستقر ثم يضؤل. وبقول آخر، ففي مسار العلاقة بين الرقمين، تمر فترة يرتفع فيها الرقمان معاً، ثم تليها فترة يرتفع فيها أحد الأرقام ويبقى الآخر ثابتاً (عند قوس شكل المظلة) ثم تليها فترة يستمر الرقم الأول في الارتفاع في حين ينكمش الآخر أو يستمر ثابتاً تقريباً. ويشبه ذلك التعاقب بين فترات زيادة عدد مجموعة بيولوجية مُعينة، مثل الفراش الغجري، ثم ميلها إلى الثبات أو الانقراض.

وسعى ماي وفايينبوم إلى معرفة طرق استعمال القطع المُكافئ مراراً وتكراراً في وضع مُعين، مع تعديل المنحنى اللاحق بحسب نتائج المنحنى السابق عليه، أو ما يُعرف بمبدأ «التغذية الراجعة». ويُساعد القطع المُكافئ في تسهيل صنع «خريطة» من هذا النوع تفيد في الحسابات المرتبطة بحال الاضطراب.

وفي كثير من الأحيان، تبدو الحسابات المبنية على القطع المُكافئ وكأنها بعيدة عن جوهر تعاطي الفيزياء التقليدية مع الظواهر المُعقّدة. فبدل محاولة حل مُخطط متشابك، يُعطي القطع المُكافئ إمكان إجراء حساب مُبسط، وتكراره المرة تلو الأُخرى. وبذا، تتلخص مهمة من يُجري التجارب باستخدام الأعداد، في المُراقبة، مثل حال الكيميائي الذي يراقب تفاعلاً في أنبوب المختبر. ويؤدي الاستخدام المُتكرر للقطع المُكافئ لصنع تجربة تُعطي في نتيجتها أعداداً، ربما لا تستقر في النهاية، بل تتذبذب في هامش ضيّق بين عددين غير متباعدين. ووصف ماي الوضع الأخير بأنه تقلّب فوضوي لا يظهر إلا لعين من يراقبه.

وعزم فايينبوم على إجراء تجربة عددية على ذلك النوع من التقلّب الضئيل في هامش ضيق، وفي المقابل، استمر أيضاً في استعمال الطرق التقليدية لحل المُعادلات غير الخطيّة. ولكن الامكانات الكاملة لذلك النوع من المُعادلات لم تتوضح لعينيه إلا لاحقاً، على رغم إدراكه أن الاحتمالات المتضمنة فيها تبدو لا نهائية. وقد علم أيضاً أن ثلاثة علماء رياضيات من «لوس آلموس» هم نيكولاس ميتروبوليس وبول شتاين ومايرون شتاين، قد فكروا في «خريطة» مُشابهة في العام ١٩٧١.

وأخيراً وجّه بول شتاين تحذيراً إلى فايينبوم يُنبّهه فيه إلى التعقيد الهائل الذي تنطوي عليه تلك الـ«خريطة»، مما يجعل صنعها مستحيلاً. إذا كان الشكل الأبسط منها يتضمن احتمال الوصول إلى تذبذب لا نهائي، فكيف إذا رسمت نظاماً من تلك المُعادلات ليُعبّر عن النُّظُم الحقيقية؟

في التاريخ الوجيز لـ«نظرية الفوضى» (الكايوس)، تُعطي هذه المُعادلة السهلة المظهر

مثالاً قوياً عن تعدد الطُّرُق التي ينظر فيها العلماء إلى المسائل المختلفة. فبالنسبة لنيكولاس ميتروبوليس وبول شتاين ومايرون شتاين، تتجسد المسألة في إيجاد كاتالوغ عن الأنماط الهندسية اللاكميّة (طوبولوجيا) من دون استعمال أي عدد كمرجع. ثم تتكرر العملية، عبر «التغذية الراجعة»، عند نقطة مُحدّدة، ومراقبة القفزات التي تحدث على الرسم البياني للقطع المُكافئ. ومع تقافز القيم العددية من يمين ذلك الرسم إلى يساره، يكتب العلماء سلسلة من «يمين» و«يسار». وتملك تلك السلاسل أهمية خاصة بالنسبة لعلماء الرياضيات لأنها تُظهر أن التقافز العددي يتّبع نمطاً مُحدّداً؛ في حين لا يتنبه علماء الفيزياء لهذا الأمر، فيعتبرونها سلاسل من تكرارات مملة ورتيبة.

وتغيرت النظرة اليها في العام ١٩٦٤، عندما تعامل معها لورنز باعتبارها تشبيهاً عن سؤال عميق في ظاهرة الطقس. بلغ السؤال حدّاً من العمق إذ إن أحداً لم يسأله سابقاً: هل ثمة طقس أصلاً؟ هل يملك الطقس في الكرة الأرضية مُعدّلاً وسطياً، على المدى البعيد؟ وبالنسبة إلى معظم علماء المناخ، بدا الجواب بديهياً لأن أي سلوك متقلب له مُعدّل وسطي. ولكن التمعّن في السؤال يُظهر أنه ليس بديهياً تماماً. فكما أشار لورنز، فإن مُعدّل الطقس قبل اثني عشر ألف سنة يختلف عما كانه في الإثني عشر ألف سنة التي سبقتها، عندما غطّت الثلوج مُعظم قارة أميركا الشمالية. هل وُجد طقس ثم تغيّر بفعل أسباب فيزيائية معينة؟ أم يوجد طقس أبعد مدى بحيث أن تلك السنوات تبدو وكأنها دورات ضمنه؟ أم أن نظاماً مثل الطقس لا يحوز مُعدلاً وسطياً على الاطلاق؟

لقد فكّر لورنز في سؤال ثان. لنفترض أن المُعادلات التي تتحكم في نظام الطقس اكتُشفت، ثم تبيّن أنها لا خطيّة، فكيف السبيل إلى حلّها؟ وشرع لورنز في التأمل في الطقس على ضوء مُعادلات الفارق اللوجستي.

ومثل ماي، تفحّص لورنز التقلّب الذي يحدث في المُعادلة عندما يجرى التلاعب بمتغيّر مُعيّن. وعند القيم المنخفضة للمتغيّر، ظلّ النظام ثابتاً عند نقطة مُعيّنة، بمعنى أن الطقس أظهر كثيراً من التغيّر، لكن ضمن حدود ضيّقة. لقد تغيّر الطقس، ولم يتبدّل

المناخ. مع ارتفاع القيمة العددية للمُتغيّر، بات النظام يتأرجح بين نقطتين، لكن تذبذبه ظل يحوم حول قيمة عددية ثابتة. ومع تجاوز قيمة العنصر المُتغيّر حدوداً مُعيّنة، شاهد لورنز انبثاق الفوضى. ولأنه اهتم بالمناخ، سأل عن إمكان حدوث سلوك دوري فيه (يكون متمحوراً حول مُعدّل وسطي ما) من خلال الاستمرار في «التغذية الراجعة» للمُتغيّر.

وجاءته الإجابة وفحواها أن المُعدّل الوسطي تذبذب بطريقة عشوائية. وعند تلك النقطة، يؤدي تقلّب العنصر المُتغيّر بدرجة طفيفة، إلى تقلّب عنيف في المعدّل الوسطي. وبمقارنة نظام من المُعادلات الرياضية بالمناخ، استنتج لورنز أن مناخ الكرة الأرضية، على المدى الطويل، لا يستقر طويلاً عند توازن مُعيّن.

ومن وجهة نظر رياضية، فلربما نُظر إلى هذا النظام من المُعادلات باعتباره فاشلاً، انطلاقاً من أنه، بالمعنى التقليدي، لا يُثبت شيئاً. ومن وجهة نظر الفيزياء، يمكن القول إن ذلك البحث مُخطئ لأنه لا يستطيع تبرير الاعتماد على تلك المُعادلة البسيطة كتشبيه عن حال نظام مُعقّد مثل مناخ الأرض. ومع ذلك، آمن لورنز بقوة أن ما اكتشفه يحوز دلالة مهمة. وأورد في ورقته: «يشعر الكاتب بأن التشابه لم يأت من المصادفة المحض. إذ تلتقط «مُعادلة الفارق اللوجستي» الكثير من الرياضيات التي يتضمنها انتقال نظام مُتدفق، من حال إلى آخر. وكذلك الحال بالنسبة إلى ظاهرة عدم الاستقرار برمتها». قبل عشرين سنة من ذلك، لم يكن أحد ليفهم ذلك الادعاء القوي، الذي ظهر في مقال نشرته مجلة «تيلوس»، المجلة المُعتمدة لعلم المناخ السويدي، ونفى إمكان استقرار المناخ، ومن ثم استحالة توقّع الطقس، على المدى الطويل. لقد قاد ذلك النظام من المُعادلات لورنز إلى التعمّق في النُظُم الفوضوية واحتمالاتها، وربما على نحو أعمق مما ظهر في تعبيراته المُستقاة من علم المناخ.

ومع استمراره في تقصّي التبدّل في النُظُم الديناميكية، أدرك لورنز أنها أكثر تعقيداً من «مُعادلات الفارق اللوجستي»، على رغم استعماله الدرجة الرابعة من تلك المُعادلات. إذ تُضمر تلك النُظُم أيضاً أن أكثر من حل وحيد ومستقر ممكن. من المستطاع أن يلاحظ

المُراقب نوعاً من السلوك عبر فترة زمنية مديدة، مع ظهور نوع آخر من السلوك عبر فترة مديدة أُخرى، وباعتبار الأمرين كليهما جزءاً طبيعياً في النظام. ويُسمّى ذلك النظام «غير الانتقالي». ومن المحتمل أن يستقر متوازناً في نقطة توازن مُعينة، ثم ينتقل إلى الأخرى، أو يتأرجح بينهما. ولا يتبدّل من حال إلى آخر، إلا تحت تأثير قوة خارجية. وبالمعنى الأشد ابتذالاً، يمكن اعتبار «رقّاص الساعة» مثالاً للنُّظُم غير الانتقالية. إذ تأتيه قوة خارجية منتظمة، عبر لفّ الزنبرك وتهيئته (أو بواسطة البطارية)، فيتأرجح بانتظام لأن الطاقة المُضافة إليه توازي ما يفقده نتيجة الاحتكاك. إذا ضرب أحد بقبضته على الساعة كلها، يختلّ عمل «الرقّاص» للحظة، ثم يعود إلى التوازن ثانية. وفي المقابل، تحوز الساعة نقطة توازن أُخرى مما يوازي وجود حلّ آخر صحيح لمُعادلات الحركة، وهي الوضع الذي لا يتأرجح فيه رقّاص الساعة، بل يقف بسكون وثبات.

وربما حاز المناخ نظاماً غير انتقالي أشد تعقيداً، مع إمكان ظهور أكثر من نوع من السلوك عبر فترات مديدة.

ولسنوات قبل ذلك، عرف علماء المناخ أن نماذج الكومبيوتر عن المناخ تتيح التوصّل إلى نقطتي توازن مختلفتين كلياً، بالنسبة إلى النظام المُكوّن من مناخ الأرض ومحيطاتها. وخلال الماضي الجيولوجي للأرض، لم توجد فعلياً نقطة توازن ثانية، لكنها موجودة كاحتمال مُضمر في نظام المناخ. ويُعبِّر الاختصاصيون عن ذلك بمصطلح «مناخ الأرض البيضاء» حيث تُغطي الثلوج القارات، فيما تتجلّد أسطح المحيطات. إن هذه الأرض المُجمّدة تعكس ٧٠ في المئة مما يصلها من ضوء الشمس، وهو ما يساهم في الحفاظ على برودتها. وتُصبح طبقة التروبوسفير، وهي الجزء القريب من سطح الأرض من الغلاف الجوي، صفيقة. وتنخفض سرعة الرياح والعواصف، بسبب تأكل التروبوسفير. وتصبح الأوضاع على الأرض أقل ملاءمة لاستمرار الحياة كما نعرفها.

وتملك نماذج الكومبيوتر عن المناخ والطقس ميلاً قوياً لانتاج نظام «الأرض البيضاء»، بحيث يعجب بعض علماء المناخ من سبب عدم تحققه فعلياً. وربما الأرض محظوظة كثيراً

بمناخها. ولكي يتجه المناخ نحو سيناريو «الأرض البيضاء»، يجب أن تأتيه دفعة من مصدر خارجه. وتمكّن إدوارد لورنز من إنتاج نموذج آخر لسلوك المناخ، سمّاه «غير انتقالي بصورة تقريبية». ويستقر سلوك ذلك النظام لفترة مديدة حول نقطة توازن مُعينة، ويتأرجح حولها ضمن حدود محدودة. ثم، ومن دون سبب ظاهر، ينتقل إلى نوع آخر من السلوك العشوائي، بحيث يتأرجح حول نقطة توازن أُخرى. وعلى رغم شيوع نظام لورنز المُسمّى «غير انتقالي بصورة تقريبية»، فإن خبراء النماذج الكومبيوترية عن المناخ تعمّدوا تجنّبه لأسباب كثيرة. فهو غير قابل للتوقّع بصورة دراماتيكية. وكذلك اعتاد أولئك العلماء بناء نماذج تتوازن حول نقطة قريبة مما يحدث فعلياً في مناخ الأرض. ولتفسير التقلّبات الكبرى في المناخ، بحثوا احتمال تأثير عوامل خارجية، مثل دوران الأرض حول الشمس.

وعلى الرغم من ذلك، لا يصعب على أي منهم معرفة أن النظام «غير الانتقالي بصورة تقريبية» ينجح في تفسير سبب تكرار عصور الجليد على الأرض، بطريقة غير منتظمة ولفترات غير متساوية. وإذا صحّ ما اقترحه لورنز، ينتفي البحث عن سبب خارجي، لأن العصور الجليدية تغدو نتاجاً للكايوس واحتمالاته.

استعمل فايينبوم الآلة الحاسبة الشهيرة، من نوع «اتش بي - ٦٥»، بكثافة لأنها مثّلت جسراً بين الورقة والقلم وبين الكومبيوتر الذي لم يكن قد حقق اختراقاً كبيراً في الأوساط العلمية. ولم يعلم شيئاً عما اكتشفه لورنز. وفي العام ١٩٧٥، خلال لقاء في جامعة «آسبن» بولاية كولورادو، سمع ستيفن سمييل يتحدث عن مُعادلات الفرق اللوجستي من الدرجة الرابعة. ويبدو أن سمييل فكرّ أن النقطة المُحددة التي تنتقل فيها الخرائط البيانية من الانتظام إلى الكايوس تتضمّن الكثير من الأسئلة المفتوحة التي لم تجد بَعدُ إجابات عنها. لذا، شرع فايينبوم في تجديد النظر في تلك النقطة وأسئلتها. وبمعاونة الآلة الحاسبة، أخذ يستعمل مزيجاً من علم الجبر التحليلي والتقصي الرقمي للتوصّل إلى فهم أفضل للخرائط البيانية التي تُعبّر عن مُعادلات الفرق من الدرجة الرابعة، مُركزاً على الحدود التي تفصل بين الانتظام والكايوس.

وعلم أيضاً أن تلك المنطقة تُشبه الحدود الغامضة بين السريان الهادئ والتدفق الفوضوي. كذلك فإنها تُشبه المنطقة التي حاول روبرت ماي لفت نظر بيولوجيّ الأنواع اليها، باعتبارها الفاصل بين النظام والنمو العشوائي في عدد المجموعات الحيّة. فعلى درب الوصول إلى الفوضى، تحدث مجموعة من الأشياء مثل مُضاعفة الدورة، وانقسامها إلى دورتين ثم أربع ثم ثمان وهكذا. وتسلك تلك الانقسامات في نمط خلاّب، إذ تحدث في النقاط التي يؤدي فيها التغيير الطفيف في معدل الإخصاب، مثلاً، إلى تغيير العدد الكلي للسكان. وقرر فايينبو م احتساب قِيَم العنصر المُتغيّر التي يظهر عندها الانقسام.

وفي النهاية، قاده بطء الآلة الحاسبة لتحقيق اكتشاف في آب (اغسطس). فبعد العمل دقائق على الآلة الحاسبة، وقد بدت شهوراً، أمكن تحديد القيمة التي ينطلق منها الانقسام. وكلما توغل أيضاً في الحساب، استغرق النظام وقتاً أطول للانتقال إلى الحال الجديد. وبمساعدة الكومبيوتر وطابعته، فات فايينبو م أن يُلاحظ أي نمط مُحدد من السلوك. ولكن، توجّب عليه أيضاً أن يكتب الأرقام يدوياً. وعليه أن يُفكّر بهما، خلال فترات الانتظار، وعليه أن يتوقع الإجابة التالية أيضاً. وفجأة، التمعت الأرقام في رأسه. وتبيّن له أنه لم يعد بحاجة إلى التخمين! لقد ظهر انتظام غير منتظر في النظام. وأخذت الأرقام في التقارب هندسياً، كما تتقارب أعمدة الهاتف الضخمة لمن يراها من بُعد، على الرغم من كبر المسافة التي تفصلها فعلياً. وعلى نحو المسافات التي تفصل تلك الأعمدة بعضها عن بعض، فإن نسبة الرقم التالي إلى سابقه تساوي نسبة الرقم الذي يليه إليه وهكذا. لم يكن تضاعف الدورات قد بات يسير بوتيرة سريعة، بل إن تلك الوتيرة نفسها صارت منتظمة.

لماذا ظهر ذلك الانتظام؟ تقليدياً، يؤشر ظهور التقارب الهندسي إلى أن شيئاً ما، في مكان ما، يُكرّر نفسه عبر مقاييس مختلفة. ولكن، إذا احتوت المُعادلة على نمط ما من المقاييس، فإنه لم يكن شيئاً معروفاً عنها. واحتسب فايينبو م معدل التقارب إلى أقرب دقة

على آلته الحاسبة، ثلاثة كسور بعد الفاصلة، فخرج له رقم مُحدد ٤,٦٦٩. هل لهذا الرقم دلالة مُعينة؟

وفي رد فعل منطقي بالنسبة لمن يتعامل بالأرقام، قضى فايينبوم بقية يومه مُحاولاً إيجاد صلة بين هذا الرقم والثوابت العددية مثل النسبة التقريبية، وهو الثابت الذي يستخدم في احتسابُ محيط الدائرة. والمفارقة أن روبرت ماي أدرك لاحقاً، أنه رأى أيضاً ظاهرة التقارب الهندسي. ولكنه نسيها بسرعة. فمن وجهة نظره كعالم أيكولوجي، بدا الأمر وكأنه مجرد خصوصية عددية. ففي عالم النُظُم الفعلية في البيئة، مثل عدد مجموعات الحيوانات والنماذج الاقتصادية، تُصبح رؤية التشوّش في احتساب الأرقام أمراً مألوفاً. وبذا، توقف ماي عند النقطة التي دفعته أصلاً إلى أبحاثه، وهي الاضطراب في ظواهر المجموعات الحيّة. ولم يتخيّل أن مثل هذا التفصيل العددي ينطوي على شيء فائق الأهمية.

وعلم فايينبوم ما الذي توصّلت إليه يداه، لأن التقارب الهندسي يعني أن شيئاً ما في تلك المُعادلة يسير في درب المقاييس التي يعلم أهميتها جيداً إذ ترتكز «نظرية إعادة التطبيع» عليها. وتعني ظاهرة المقاييس، أن صفة ما تُحافظ على نفسها عبر مقاييس مختلفة، فيما تتغيّر الأشياء الأخرى. ثمة انتظام مستتر تحت سطح الاضطراب، بحسب تلك المُعادلة. ولكن أين هو؟

أخذ فايينبوم يفكر بعمق في الخطوة التالية. يمر الصيف سريعاً إلى الخريف في «لوس آلموس». وشارف تشرين الأول (اكتوبر) نهايته، حين خطرت بباله فكرة غريبة.

وقد علم أن ميتروبوليس وشتاين وشتاين اشتغلوا على مُعادلات أُخرى، ووجدوا في أرقامها أنماطاً تعبر المقاييس المختلفة. وحصل على تلك الأرقام. وتأملها. وللمثال، ظهرت في الأرقام أنماط من تكرارات «يمين» و«يسار»، وبانتظام عددي مُحدّد. وتبيّن له أن أحد تلك المقاييس يتضمن عناصر هندسية تتعارض مع معادلة القطع المُكافئ التي عمل عليها. فعاد إلى آلته الحاسبة، ليعيد الحسابات مُجدداً، رقماً رقماً، بالاعتماد على

مُعادلات علم المثلّثات، مما جعل عمله بطيئاً. ولذا، سعى إلى إيجاد أشكال أبسط من تلك المُعادلات، بما يمكنه من اختزال الحسابات. وبتصفح تلك الأرقام، أدرك بسرعة أنها تتقارب هندسياً، وهو ما يعني أنه يكفي حساب مُعدل تقاربها. ومرة أُخرى، وضمن الدقة التي تتيحها الآلة الحاسبة، ظهر له الرقم عينه ٤,٦٦٩.

ولم يكُد يُصدق أن أرقام تلك المُعادلات، التي عمل عليها ميتروبوليس وشتاين وشتاين تُظهر اتساقاً هندسياً وانتظاماً. بل أظهرت انتظاماً مُطابقاً لما حصل عليه من نظام لمُعادلات أكثر بساطة. ولا توجد أي نظرية فيزيائية أو رياضية في إمكانها أن تشرح سبب ظهور نتيجة وحيدة من نظامين مختلفين، شكلاً ومضموناً، من المُعادلات. واتّصل فايينبوم بشتاين الذي لم يُصدق مثل تلك المُصادفة التي تفتقد إلى براهين قوية. ولاحظ أن دقة الأرقام لم تكن عالية، فقط ثلاثة أعداد بعد الفاصلة العشرية. واتصل فايينبوم بوالديه في ولاية نيوجيرسي ليخبرهما أنه اكتشف شيئاً مهماً. وأخبر أمه أن ما اكتشفه قد يجعله عظيم الشأن. ثم شرع في تجربة مُعادلات أُخرى لينشئ منها نظاماً يتضمّن تفرعات قبل اتجاه نظامها إلى الفوضى. وفي كل مرّة، ظهر ذلك الرقم عينه.

لقد تلاعب فايينبوم مع الأرقام طوال عمره. ومنذ مطالع مراهقته، أتقن فن استخراج القيم الخوارزمية للأعداد، وكذلك قيمتها بالنسبة لجيب الزاوية؛ والتي يحتاج الدارسون إلى جداول متخصصة لمعرفتها. لكنه لم يتقن التعامل مع الكومبيوتر. واقتصر تعامله مع آلات الذكاء الالكتروني على الآلة الحاسبة.

ومال معظم علماء الفيزياء والرياضيات، حينذاك، إلى ازدراء التفكير الميكانيكي الذي يمليه التعامل مع الكومبيوتر. وأحسّ بأن الوقت قد حان ليدخل عالم الكومبيوتر. وطلب من زميل له أن يُعلمه لُغة البرمجة المعروفة باسم «فورتران». وبعد يوم، استطاع أن يُعيد احتساب الرقم الذي توصّل إليه بدقة خمسة أعداد عشرية، فصار ٤,٦٦٩٢٠.

وفي تلك الليلة، طالع كُتيّباً عن مُضاعفة الدقة. وفي اليوم التالي، صار الرقم عينه يساوي ٤,٦٦٩٢٠١٦٠٩٠. وتوقّف عند هذا المستوى من الدقة، أي ما يكفي لإقناع

شتاين بأهمية ذلك الرقم. لكنه لم يكن متحققاً من اقتناعاته. لقد صمّم على البحث عن الانتظام، وذلك ما تغنيه دراسة الرياضيات، لكنه انطلق في بحثه وهو يعلم أن بعض الأنواع من المُعادلات، كمثل بعض النُّظُم، تتصرف بطريقة خاصة ومُميّزة. وقد كانت تلك المُعادلات سهلة أيضاً. إن شيئاً في قلب تلك المُعادلات المختلفة، التي اختبرها، يكرّر نفسه المرةُ تلو الأُخرى، مما أظهر الرقم عينه مراراً. لقد عثر على شيء ما، ربما مُجرد فضول أو قانون جديد في الطبيعة.

ماذا لو أن اختصاصياً في علم الحيوانات من عصور ما قبل التاريخ، يُقرّر أن ثمة أشياء أثقل من أشياء أُخرى، أي أنها تملك خاصية غامضة يسميها وزناً، ثم أراد أن يختبر نظريته علمياً. لم يمارس عملية وزن، ولا يملك ميزاناً، لكنه يظن أن لديه فكرة ما عن هذا الموضوع. يرى حوله أفاعي كبيرة وصغيرة، ودبباً ضخمة وأقل ضخامة. ويتكوّن لديه انطباع أن الأكبر والأضخم هو الأثقل. ثم يصطنع ميزاناً من نوع ما. ولدهشته، تتماثل أوزان بعض الأفاعي على رغم تفاوتها في الطول. وينطبق الوصف نفسه على الدببة أيضاً. وتبلغ دهشته ذروتها إذ تتساوى أوزان الأفاعي والدببة عند رقم واحد = ٤٫٦٦٩٢٠١٦٠٩٠. يستخلص أن الوزن ليس هو الموضوع، بل يجب إعادة النظر في المفهوم برمته.

تمر نُظُم كثيرة بمراحل انتقالية قبل دخولها الفوضى. وينطبق الوصف على جريان الأنهار وتأرجح رقّاصات الساعة والتذبذبات الإلكترونية. ولآجال طويلة، ظلّت تلك المراحل الانتقالية عصيّة على الفهم. لقد تعرّف الفيزيائيون على الكثير من المُعادلات الصحيحة. ودوماً، بدا مستحيلاً الانتقال من فهم المُعادلة إلى التيقّن من سلوك النظام على المدى الطويل.

ولحسن الحظ، فإن سير تلك النُّظُم المُعقدة، بات أكثر سهولة مع ظهور الرسوم البيانية وخرائطها اللوجستية. وأوحى ما اكتشفه فايينبوم أن تلك المُعادلات لم تكن سوى مشهد جانبي، وربما لا قيمة له. وعندما ظهر الانتظام، فقد بدا كأن لا علاقة له مع

المُعادلات الأصلية ولأوصافها. وسواء تعلّق الأمر بمُعادلات اللوجستية من النوع الرابع أو بمُعادلات علم المثلثات، فإن النتيجة جاءت عينها. وبحسب تعبير فايينبوم: «يرتكز علم الفيزياء على عزل آلية مُحدّدة ودراستها، بحيث تسير بقية الأشياء معها. . . لقد تبدّد ذلك التفكير وتلاشى. وصارت الصورة أن من المُمكن معرفة المُعادلات، لكنها لا تُفيد. . .

. . . في إمكانك أن تجمع الكثير من الصور الميكروسكوبية، لكنك لا تستطيع صوغها في شيء يصلح على المدى البعيد. . . إنها ليست الشيء المُهم في هذه المسألة. . . ثمة تغيير في ما الذي تعنيه «معرفة» شيء ما».

على رغم العلاقة الواهية بين تلك الأرقام والفيزياء، صمّم فايينبوم على ابتكار طريقة جديدة لاحتساب المسائل غير الخطيّة المُعقّدة.

وعندما تتعلق مُعادلاتها بعلم المُثلثات، استعمل علم المثلثات في حساباتها. واكتشف أن النظرية الشاملة تعني ضرورة التخلّص من تلك التقنيات في الاحتساب كلها. وتبدّى له أن الانتظام لا علاقة له مع علم المثلثات. لا علاقة بين الانتظام والقطع المُكافئ. لا علاقة له بأي نوع من المُعادلات المعروفة. ولكن لماذا؟ إنه أمر مُحبط أيضاً. لقد رفعت الطبيعة الستار عن أحد أسرارها العميقة، فتكشف للعيون للحظة، ثم غاب. لقد كشفت الطبيعة عن انتظام غير متوقع في الفوضى. فأي أسرار تُخبئ خلف ستارها السميك؟

وجاء إلهام مُفاجئ لفايينبوم مُتّخذاً هيئة صورة، بالأحرى انطباع عقلي عن أشكال صغيرة تتحرك، وشيء كبير. التمعت في ذهنه صورة مضيئة وحادة. ولربما لم تكن سوى قمة جبل الجليد الذي يُشكّله الوعي. تتعلق الصورة بالمقاييس. وأعطت فايينبوم الإرشاد إلى الطريق المطلوب. ولم يحتج إلى شيء آخر. ففي تلك الأثناء، شُغل بدرس الجواذب. وارتكز التوازن المستقر الذي توصلت اليه خرائط النُّظُم التي يدرسها، إلى نقطة ثابتة تجذب إليها كل شيء آخر. وبغض النظر عن المجموعة الأصلية التي تُعبّر عنه، فإنها ستنجذب إلى تلك النقطة، وتتأرجح حولها.

ثم يحدث تضاعف في الدورة، فينقسم الجاذب إلى اثنين. وفي البداية، يكون

القسمان متقاربين. ومع الاستمرار في تقلّب العنصر المُتغيّر، ينفصل أحدهما عن الآخر. ومع تضاعف آخر في الدورة، ينقسم كل منها، وفي الوقت عينه، ليعطي اثنين وهكذا. ويُساعد رقم فايينبوم في توقع وقت وقوع تضاعف الدورة. واكتشف أيضاً أنه يستطيع توقع القيمة التي تتخذها تلك الجواذب خلال تلك العملية المُعقّدة. ويُشبه ذلك القول إنه يستطيع أن يعرف ما سيكونه عدد السكان في بلد ما، في السنة التالية، وبعد أن تدخل تقلبات السُكان فيه مرحلة الكايوس. بل إن أرقام تلك القيم اتّبعت قانون المقاييس المتعددة أيضاً.

استكشف فايينبوم أرضاً وسطى بين الرياضيات والفيزياء. وبدا تصنيف عمله صعباً. لم ينتمِ إلى الرياضيات؛ فلم يحاول إثبات شيء ما. لكنه درس الأرقام، ولكن الرياضيات لا تتحدّد بالأرقام إلا بطريقة اسمية وشكلية. إن الأفكار هي قلب الرياضيات فعلياً. لقد صنع فايينبوم برنامجاً لعلم الفيزياء، ويشبه التجارب الفيزيائية، مهما بدا هذا القول غريباً. لقد شكّلت المُعادلات والأرقام موضوع دراسته، بدل الذرّة والكوارك. لقد امتلكت تلك الأرقام مسارات ومدارات. واحتاج أن يختبر سلوكها. ولقد احتاج، بحسب عبارة صارت كليشيهاً في علم الكايوس، إلى أن يصنع حدساً. وبدل مُسرع الجزيئات والمفاعلات النووية، استعمل الكومبيوتر مختبراً. فمع البناء النظري، ابتكر منهجية في البحث. فتقليدياً، يعمد خبراء الكومبيوتر إلى ابتكار مسألة، ثم يُدخلونها إلى تلك الآلة، ثم ينتظرون مرورها في سلسلة من المُعادلات لكي تحتسب نتيجتها. ولكل مسألة حلّ وحيد. وتطلّب فايينبوم وعلماء الكايوس الذين جاؤوا بعده، أكثر من ذلك بكثير.

أرادوا ما صنعه لورنز: خلق نموذج مُصغّر من الكون لكي يراقبوا تطوّره ثم يعدلوه ويُبدّلوا ملامحه، ويراقبوا النتيجة. لقد تسلّحوا بايمان من نوع جديد، يقول إن التغييرات الهيّنة في إمكانها إحداث تغيّرات كبيرة في النظام كله.

اكتشف فايينبوم بسرعة أن الكومبيوترات المُستخدمة في «لوس آلموس» لا تتفق مع

مساعيه وطرائقه التي أراد تطويرها. فعلى رغم المصادر الهائلة، لم يمتلك المختبر كومبيوترات تملك المقدرة على صنع الصور البيانية وعرض الصور الرقمية. وامتلك قسم الأسلحة بعضاً من مثل تلك الكومبيوترات. وأراد فايينبوم أن يحوّل الأرقام إلى نقاط على خرائط بيانية. ولجأ إلى أقدم طريقة في رسم الخرائط: اللفائف الطويلة من الورق. واستخدمها بحيث تُطبع عليها الأرقام على شكل خطوط من الفراغات التي تليها نجوم وعلامات الزائد. وقضت السياسة المُتّبعة في «لوس آلموس» بإعطاء الكومبيوتر الكبير حصصاً أكبر من مجموعة من الكومبيوترات الصغيرة. إنها سياسة تستند إلى فكرة الحل الوحيد للمسألة المفردة. ومال البحّاثة للابتعاد عن الكومبيوترات الصغيرة. كما خضعت مشتريات الأقسام للتدقيق الحكومي الصارم. واقتضى الأمر الكثير من المناورات لكي يحصل فايينبوم على تمويل لشراء «آلة حاسبة للمكتب» بمبلغ عشرين ألف دولار.

ومنذ ذاك، بات باستطاعته أن يغير ويبدّل في معادلاته على هواه، وأن يتلاعب بمنحنياتها وصورها البيانية وكأنه يعزف على آلة موسيقية. وفي البداية، حصرت الكومبيوترات القوية، التي تقدر على إنتاج صور بيانية متطورة في الأماكن المحروسة بتشدد في مختبر «لوس آلموس». واستعمل فايينبوم حواسيب تتصل عبر خطوط هاتفية بحواسيب خارقة مركزية. سهّل هذا الترتيب عمله من جهة، لكنه منعه من رؤية الإمكانات الهائلة التي تملكها الكومبيوترات الخارقة على الطرف الآخر من الخط. وشيئاً فشيئاً، تدخّل هذا التعقيد الأمني بسير العمل العلمي. وصار إنجاز أي قسم من العمل، حتى لو كان سطراً في برنامج للكومبيوتر، يقتضي انتظار موافقة الكومبيوترات المركزية عليه!

وفي غمرة انشغاله بهذا العمل الإلكتروني الهائل، ارتسم في ذهنه سؤال عن نوع الرياضيات التي تناسب الأوضاع المتعددة المقاييس التي كانت ترتسم أمامه في نماذج الكومبيوتر. وتوضح له أنه يحتاج نوعاً جديداً من الرياضيات. فتلك الرسوم البيانية، بدا أنها لا تلتزم مرجعية مقياس مُحدد؛ بل هي ذاتية المرجعية بمعنى أن كل حركة تستند إلى

أخرى مُضمرة فيها. والتمعت أمام عينَي فايينبوم صورة من التموج، بحيث تعتمد كل مُعادلة على مقياس يتغيّر مع المُعادلة التي تليها وهكذا. ولجأ إلى المُعادلات الرياضية لنظرية «مجموعة إعادة التطبيع»، التي تستعمل المقاييس للتخلص من الكميّات ذات الطابع اللانهائي فتحوّلها إلى كميات سهلة نسبياً. وفي ربيع العام ١٩٧٦، أوجد نوعاً من الرياضيات أشد حيوية وكثافة مما شهده ذلك العلم تاريخياً. وركّز اهتمامه كله على تلك الرياضيات الجديدة، فبدا وكأنه في حال ذهول لا يفيق منها. وانكب على كتابة برامج للكومبيوتر، ثم إعادة كتابتها، من دون توقف وباستعمال القلم الرصاص والورق.

لم يستطع طلب مساعدة قسم الكومبيوتر، الذي أُشير إليه باسم «القسم سي» في «لوس آلموس»، لكي لا يعود إلى الإنتظار الرتيب لمرور المعلومات ورجوعها عبر الخطوط الهاتفية. وهناك سبب آخر. فقد صُمّمت الكومبيوترات بحيث تنفصل عن الخطوط إذا توقف المستعمل ليُفكر في الخطوة التالية لأكثر من خمس دقائق، مما أربك عمله دوماً وأثار أعصابه باستمرار وتركه في حال الهياج شبه الدائم. عمل على هذا النحو المحموم أكثر من شهرين، وعلى مدار الساعة من دون استراحة. وكثيراً ما ألقى نفسه على الفراش مدة ساعتين من دون أن يغطّ في النوم، ليستيقظ فيكتشف أنه يفكر في النقطة التي توقف عندها بالضبط. وتقلّص طعامه تدريجاً، بحيث اقتصر على القهوة أحياناً. وحتى حين اهتم بالأكل، اكتفى بقطع من اللحم الأحمر والقهوة الثقيلة وقليل من النبيذ الأحمر. وتندّر عليه زملاؤه بأنه يحصل على الفيتامينات من السجائر. وانتهى شهرا عدم النوم والإبداع باستدعاء طبيب لعلاج حال طارئ! ووُضع فايينبوم على نظام علاج من حبوب الفاليوم المنومة. وأُرغم على أخذ عطلة. وقبل أن يأتي الطبيب، استطاع فايينبوم أن يبتكر نظرية ثورية في علم الرياضيات، سرعان ما عُرفت باسم «النظرية الشاملة».

لقد رسمت النظرية الشاملة الحدّ الفاصل بين الجميل والنافع. فتقليدياً، عندما تصل الحسابات إلى نقطة معينة من التدقيق الفائق، يهملها علماء الرياضيات بدعوى أنها لا تعود ذات دلالة. وفي المقابل، فعند نقاط فائقة الحساسية، يعوز علماء الفيزياء التقليدية الأرقام

اللازمة للتعبير عن الحال التي يشتغلون عليها. وأعطت «النظرية الشاملة» الأمل بأن حلّ مسائل بسيطة نسبياً في الفيزياء قد يفتح الطريق أمام حلّ مشاكل شديدة التعقيد. وأبعد من ذلك، وضع فايينبوم «النظرية الشاملة» في إطار نظرية «مجموعة إعادة التطبيع»، ما أعطاها الشكل الذي يُناسب علم الفيزياء، بحيث بدت كأداة قوية لحساب الأوضاع المُعقّدة كلها... تقريباً.

وفي المقابل، فإن ما أعطى «النظرية الشاملة» جمالها، جعل منها بعيدة من التصديق بالنسبة إلى الفيزيائيين. وتعني صفة الشاملة أن النُّظُم المختلفة تتصرف بطُرق مُتشابهة. والحق أن فايينبوم صبّ اهتمامه على درس الإمكانات الكامنة في حلول المُعادلات الرياضية البسيطة.

لكنه مال للاعتقاد بأن نظريته تصف حال النُّظُم كلها، في المرحلة التي تنتقل من النظام إلى الاضطراب. لقد علم العلماء منذ زمن أن الاضطراب يتضمّن طيفاً متصلاً من التردّدات المختلفة، وعلموا أيضاً أنهم لا يعرفون مصدر تلك التردّدات. وفجأة، جاء فايينبوم ليقترح أن تلك التردّدات تأتي بطريقة متتابعة، بحيث يرتكز التالي منها إلى اللاحق. ويُترجم ذلك في علم الفيزياء بأن النُّظُم الموجودة في الطبيعة تتصرف بطريقة يمكن حسابها وملاحظتها، وبأنها متشابهة كمّاً، بحسب «النظرية الشاملة». لذا، لم يسهل على الفيزيائيين تصديقها بسهولة.

ولسنوات طويلة، احتفظ فايينبوم برسائل الرفض التي جاءته من علماء الفيزياء. وقبل أن يمتلئ دُرجه بتلك الرسائل، استطاع أن يُثبت جدارة نظريته، وأن يحوز حظوة علمية عالية. ونال ما اكتشفه في «لوس آلموس» جوائز وحصد أموالاً. ولم يمنع ذلك مديري تحرير المجلات العلمية من رفض نشر مقالاته طوال سنتين، قبل أن يُسلّم المجتمع العلمي بها. ليس من السهل قبول القول إن عالماً حقق اختراقاً علمياً أصيلاً. وفي المقابل، فإن العلوم الحديثة تسير بقوة التدفق الهائل في المعلومات، التي يُقابلها تدقيق مُحايد، بحيث لا تضيّع فرصة التقاط الإنجاز العلمي الأصيل حقاً.

وفي مثال مُعبر، رفضت دورية علمية نشر مقال لفايينبوم. ولاحقاً، أعلن مدير تحريرها أن ذلك المقال الذي رُد إلى صاحبه، مثّل نقطة تحوّل في تاريخ الرياضيات. ولكن عدم نشره لم يكن خطأً لأن علماء الرياضيات التطبيقية، الذين تُخاطبهم المجلة، لم يكونوا قد حسموا أمرهم بالنسبة لنظرية الشاملة. وعلى الرغم من تلك الأمور، أثارت نظرية فايينبوم سُجالات حامية في علميّ الفيزياء والرياضيات. وبات لُبّها معلوماً في الدوائر العليا لذينك العلمين، بفضل سلاسل من النقاشات والمحاضرات والندوات وغيرها. وفي كل مرّة شرح فيها فايينبوم نظريته في مؤتمر علمي، انتهت محاضرته بطلب مئات من النسخ الضوئية منها.

تعتمد الاقتصادات الحديثة على نظرية السوق الكفيّة، التي تفترض تدفق المعلومات بيسر، لأن قدرة الناس على اتخاذ القرار تعتمد على درجة وصولهم إلى كمّ معقول، وشبه متساو، من المعلومات. ومن البديهي أن تلك النظرية تفترض أيضاً، وجود جيوب من عدم المعرفة أو المعلومات المكتومة؛ بحيث لا تُخلّ بالافتراض الأساسي عن التدفق السهل للمعلومات وشيوعها. ويفترض الاقتصاديون أن المعلومات في كل مكان. ويسلّم مؤرخو العلم بنظرية مماثلة عن الموضوع الذي يرصدونه. ويفترضون، بشيء من البداهة، أنه عندما يكتشف شيء ما أو تظهر فكرة جديدة، سرعان ما يوضعان في متناول العلماء عالمياً. ويسلمون بأن كل اكتشاف علمي، وكل مفهوم جديد، يعتمد على ما سبقه. وينظرون إلى العلم كأنه بنيان يرتفع حجراً فوق حجر. وتسير الأمور على ذلك النحو عندما ينتظر مجالاً علمياً مُحدّداً حسم النقاش بشأن مسألة مُعينة بدقة. فلم يُخطئ أحد فهم دلالة اكتشاف تركيب الحمض النووي. والحق أن تاريخ العلم لا يسير دوماً بموجب تلك الصورة الزاهية، ولا تتدفق المعلومات بالسلاسة المُفترضة. وبذا، يُشبه التدفق الفعلي للنظريات العلمية الحركة المُعقّدة التي تصفها المُعادلات اللاخطيّة، فيتخطى فهم مؤرخي العلم.

وتقدّم ولادة نظرية الفوضى (الكايوس) مثالاً عن ذلك. فلم تكن قصة عن ظهور نظرية

جديدة، بل تضمنت أيضاً صراعاً مع الأفكار القديمة ونقضاً لها. لقد ظهرت شذرات من تلك النظرية منذ زمن، على يد أنطوان بوانكاريه وماكسويل وحتى آينشتاين؛ ثم ذوت سريعاً. ولم يفهم تلك الشذرات، عند اكتشافها، سوى قلة من العلماء المتخصصين.

أُدرِكت اكتشافات الرياضيات من علماء الرياضيات، والأمر عينه بالنسبة إلى الفيزياء والمناخ. أضحت طُرُق انتشار العلم تعادل أهمية الاكتشاف العلمي.

ولكل عالم «آباء» يختارهم. ولكل «مشهدية» من الأفكار، يعود إليها دوماً. وكثيراً ما تكون تلك المشهديات منقوصة؛ فالمعرفة غير كاملة. واعتاد العلماء السير على هدي التقاليد المكينة. وبذا، يبدو عالم العلم ضيّقاً، من وجهة ما. لم تتوصل أي لجنة علمية من دفع تاريخ العلم إلى الأمام. ودوماً، تصدّى نفر قليل لانجاز تلك المهمة، عبر مدركاتهم الفردية وأهدافهم الشخصية. وبعد تلك الجهود الفردية، يأتي دور الاتفاق. ويتبلور نوع من الاجماع على أهمية الاكتشافات، وكذلك إلى من يعود الفضل فيها. والحق أن الإجماع يتضمن نوعاً من المُراجعة أيضاً. ففي خضم حرارة اكتشاف الكايوس، في آخر سبعينات القرن العشرين، لم يفهم العلماء تلك النظرية بالطريقة عينها. إن عالماً معتاداً التعامل مع النُّظُم التقليدية، التي لا تتضمن احتكاكاً ولا تبدّداً للطاقة، يجد نفسه على تواصل مع أفكار علماء روس مثل أناتولي كولموغوروف وفلاديمير أرنولد. وأما عالم الرياضيات المعتاد على النُّظُم الديناميكية التقليدية، فيميل إلى الخط العلمي الذي ترسمه أسماء مثل بوانكاريه وبيركهوف وليفنسون وسمييل. ولاحقاً، مال علماء الرياضيات أكثر إلى سمييل وغوغنهايمر وماي وريبال؛ وأحياناً إلى مجموعة علماء «لوس آلموس» مثل أولام وشتاين وميتروبوليس. ويتجه فكر عالم الفيزياء النظرية إلى ريبال ولورنز وروزلر ويورك، في حين ينشدّ البيولوجي إلى سمييل وغوغنهايمر وماي ويورك. ويمكن الاستمرار في تلك التنويعات إلى ما لا نهاية. وفي المقابل، قد يُقرّ عالم يعمل في الجيولوجيا والزلازل، بأفضال ماندلبروت، فيما قد لا يعلم اختصاصي في الفيزياء النظرية ذلك الاسم أصلاً.

وقد اندلع نقاش حاد عن دور فايينبوم. وحتى عندما شق اسمه طريقه إلى النخبة المرموقة علمياً، ظل بعض العلماء ميّالاً لإعطاء الفضل لعلماء آخرين، عملوا على تلك المسألة نفسها، قبله أو بعده ببضع سنوات. ولم يتردد بعضهم في استنكار تركيز فايينبوم على مساحة مُحدّدة من الطيف العريض للكايوس. ورأى آخرون أن ما أنجزه لا يزيد على ما حققه يؤرك مثلاً. وفي العام ١٩٨٤، دُعي فايينبوم للتحدث في «منتدى جائزة نوبل» في السويد، فزادت النقاشات عما حققه ضراوة.

ولم يكن موفّقاً في عرض آرائه، بحيث رأى بعضهم أنه ألحق ضرراً كبيراً بنفسه. ففي ذلك المنتدى، اقتبس بنوا فايينبوم مفهوماً علمياً أنجزه قبل عقدين عالم فنلندي اسمه مايربرغ. وظلّ يصف التتابعات التي صنعها بأنها «تتابعات مايربرغ»!

والحق أن فايينبوم اكتشف «النظرية الشاملة»، وابتكر نظرية لشرحها، فكان ذلك نقطة الارتكاز التي استند إليها علم الكايوس المستجد على نحو تامّ. ولم يستطع نشر ذلك الأمر بوضوح، فسعى إلى انتشاره عبر سلسلة من المحاضرات في مؤتمر علمي استضافته ولاية «نيوهامشاير» في آب (أغسطس) من العام ١٩٧٦، وعبر مؤتمر عالمي عن الرياضيات عُقد في «لوس آلموس» في أيلول (سبتمبر) من العام عينه، ومن طريق مُحاضرات ألقاها في جامعة «براون» في تشرين الثاني (نوفمبر) من ذلك العام أيضاً. وقوبل اكتشافه ونظريته بالدهشة وعدم التصديق والإثارة. وكلما أمعن العلماء في التفكير بشأن الظواهر اللاخطيّة، أحسوا أنهم مرغمون على قبول «النظرية الشاملة» لفايينبوم.

وبحسب تعبير أحد هؤلاء: «لقد بدا اكتشافاً سعيداً وصادماً القول إن اللاخطية هي سلسلة من التشابهات، إذا نُظِر إليها بطريقة مناسبة». والتقط بعض العلماء التقنيات التي توصل اليها فايينبوم، إضافة إلى نظريته. وتلاعبوا بتلك الخرائط التي اقترحها، فأخذتهم الدهشة بما يفعلون. وضربت أيديهم على الآلات الحاسبة مُتّبعة الطُرُق التي اكتشفها فايينبوم، فظهرت أرقام خطفت أنفاسهم. وعمل بعضهم على تدقيق تلك النظرية. فبعد استماعه إلى محاضرة ألقاها فايينبوم في «مؤسسة الدراسات المتقدمة» في جامعة

برنستون، سارع بريدراغ زيفيتانوفيتش، الاختصاصي في فيزياء الجُسيمات، إلى تبسيط «النظرية الشاملة» ومدّ آفاقها أيضاً. وفي المقابل، زعم لزملائه أنه يتسلى.

وسيطر موقف أكثر مُحافظة في أوساط علماء الرياضيات، الذين اعتبروا أن نظرية فايينبوم تفتقد إلى الدليل. والحق أن ذلك الدليل الرياضي لم يظهر إلا في العام ١٩٧٩، على يد أُوسكار لانفورد الثالث. أما قبل ذلك، فيذكر فايينبوم أن عالم الرياضيات اللامع مارك كاك سأل، عقب عرضه تفاصيل نظريته في مؤتمر علمي في «لوس آلموس»، عن وجود دليل رياضي أو عددي عما تحدث عنه.

وجاء جوابه قريباً من قول: «إذا كان منطقياً فلماذا يجب البرهنة عليه؟» وترك الأمر لمستمعيه لكي يحكموا بأنفسهم عما سمعوه. وعقب تلك المحاضرة، توجّه فايينبوم إلى كاك، وطلب رأيه.

وببرود لم يخل من السخرية، رد كاك: «إنه أمر منطقي حقاً... أما تفاصيل ذلك فتحتاج إلى إثبات رياضي متين!»

وانطلقت حركة الكايوس، مدفوعة بقوة «النظرية الشاملة». وفي صيف العام ١٩٧٧، نظّم الفيزيائيان جوزيف فورد وخوليو كازاتي، أول مؤتمر عن علم اسمه الكايوس. واستضافته بلدة «كومو» الصغيرة التي تقع عند الطرف الجنوبي من بحيرة «كومو» في إيطاليا. تتميّز البحيرة بمياه صافية تأتيها من جبال الألب وتُعطيها لوناً أزرق رائقاً. حضر المؤتمر حشد من مئة شخص، معظمهم فيزيائيون ولكن بعضهم من علوم بعيدة من ذلك المجال. وبحسب رأي فورد: «لقد اكتشف فايينبوم «النظرية الشاملة». وبيّن طرق تعاملها مع المقاييس. ووصف مراحل الانتقال من الانتظام إلى الفوضى، بطريقة تبدو جذّابة حدسياً... لقد صنع نموذجاً عن «الكايوس» واضحاً قابلاً للفهم العام. وتبدو نظريته وكأنها جاءت في وقت مناسب. ففي مجالات تمتد من علم الحيوان إلى الفلك، ساد التكرار منذ فترة طويلة. وتكدست الأبحاث في مجلات تضيق مجالات تخصصها بصورة مطردة. ولا

يهتم حقل علمي بما يحدث في حقل آخر. ويسود نوع من الغرابة. لقد أعرضوا عن الأسئلة الصغيرة، ودخلوا في حلقة القلق عن الظواهر المُعقّدة».

لاحقاً، عاش فايينبوم في غرفة متقشّفة، بحيث ضمّت سريراً وحاسوباً ومشغلاً للاسطوانات الموسيقية الألمانية التي جمعها بشغف. خاض تجربة مفردة لشراء قطعة أثاث منزلي، هي طاولة مرمر من ايطاليا، لكنها انتهت إلى فشل لأنها وصلته حُطاماً. وتكدّست الكتب والأوراق على رفوف الجدران. وألف التحدّث بسرعة، فيما شعره ينزلق مشعّثاً وقد باتت خصلاته البنية مختلطة بخصل بيضاء. ووصف تجربته بكلمات مُعبرة. «حدث شيء ما دراماتيكي في عشرينات القرن العشرين. ومن دون سبب ظاهر، عثر الفيزيائيون، على أشياء أساسية لوصف العالم، بمعنى أن النظرية الكمومية في الفيزياء صحيحة بشكل أساسي».

وتُخبرك تلك النظرية أنك تستطيع أن تأخذ النفايات وتصنع كومبيوتراً منها. وتشُكّل الطريقة التي نتعامل بها مع الكون. ومكّنت من التلاعب بالمواد الكيماوية ومن صنع البلاستيك وأشياء أُخرى.

وأعطت القدرة على الحوسبة. أنها نظرية رائعة، خلا أنها تبدو بلا معنى، عند مستويات مُعيّنة. عندئذ، تفتقد نوعاً من الخيال. إذا سألت ما الذي تعنيه تلك المُعادلات الكمومية فعلياً، وأي وصف تُعطيه عن العالم، فإن إجاباتها لا تتفق مع حدسك البديهي عن العالم. فبموجبها، لا تستطيع أن تتخيل جُسيماً يتحرك وكأنه ينزلق في مسار. ولا يُسمح لك ان تُمثّله تصويرياً بتلك الطريقة. وإذا سألت المزيد من الأسئلة المُرهفة، مثل سؤال عن صورة الكون بموجب تلك النظرية؛ لأتتك إجابات تبدو بعيدة عما تختبره وتشاهده يومياً في مجالات مختلفة. ربما كان وصفها للعالم صحيحاً أيضاً، ولكن لا تستطيع ان تكون متأكداً من عدم وجود طريقة أُخرى لتنظير المعلومات التي لا تتطلب ابتعاداً عن الفهم الحدسي للعالم.

ثمة افتراض قبلي في الفيزياء يقول إن الطريقة التي تفهم بها العالم تتضمّن أن تعزل

المكوّنات الأصغر والأصغر، لكي تصل إلى أكثر المُكوّنات أهمية، فتبدأ منها في التفكير الأساسي عن العالم. ويعني ذلك أنك تفترض أن الأشياء التي لا تعرفها هي مجرد تفاصيل. ثمة افتراض مفاده أن في الكون عدداً قليلاً من المبادئ التي تستطيع استنتاجها من طريق النظر إلى المادة في شكلها المُجرّد، ذلك قلب الفهم التحليلي، ثم بطريقة ما تستخدم تلك المبادئ في حلّ أكثر المشكلات واقعية التي تواجهها في الحياة اليومية شرط أن تستطيع التوصل إلى حلّ!

وفي النهاية، لكي تفهم، يجب أن تبدّل السرعة. ينبغي إعادة تنظيم الطريقة التي تفهم بها أهمية الأشياء والعيش. ربما جربت أن تُحاكي افتراضياً، على الكومبيوتر، نموذجاً من تدفق السائل. يمكن البدء في ذلك. وسرعان ما يتحوّل الأمر إلى إضاعة وقت، لأن ما يحصل فعلياً لا علاقة له بمُعادلات فيزياء الجُسيمات أو السوائل. تلك المُعادلات تصف بشكل عمومي ما يحصل في مجموعة كبيرة من النُّظُم المختلفة، عندما تُكرّر الأشياء نفسها المرّة تلو المرّة. من الواضح أن من المطلوب التفكير بطريقة أُخرى في تلك المسائل.

عندما تتأمل في هذه الغرفة، حيث يجلس شخص هنا، وتتكدّس الأوساخ هناك، وبينهما باب وأكثر، تفرض عليك الفيزياء الكمومية أن تبدأ الوصف انطلاقاً من أكثر الجسيمات أهمية وأصغرها في المادة، ثم تبدأ بالحسابات بلوغاً إلى صوغ مُعادلة موجية تصف هذه الغرفة! إنه أمر مستحيل. لا يستطيع التفكير التحليلي أن يُتوصل إلى وصف كهذا.

لم يعد من المقبول أكاديمياً أن تسأل عن غيمة. لكن الكثيرين يودون معرفة ما يحدث للغيوم، مما يعني توافر أموال للبحوث عنها. وتقع تلك المسألة في نطاق الفيزياء. تتفحص شيئاً مُعقّداً. وبالطريقة الراهنة، عليك ان تنظر إلى أكبر عدد من النقاط، أي ما يكفي من النقاط ليشير إلى موقع الغيمة، وإلى هبوب الهواء الدافئ، وإلى سرعته وغيرها. ثم تضع تلك المعلومات في أكبر كومبيوتر تستطيع العثور عليه، وتحاول التنبؤ

بما سيحدث. إن هذه الطريقة ليست واقعية». ثم يُطفئ سيجارة ويشعل أُخرى، ويتابع: «يجب النظر إلى الأمور بطريقة مختلفة».

يجب النظر إلى المقاييس المتضمنة في بنية التراكيب المختلفة، أي الكيفية التي تتواصل فيها الأشياء الكبيرة مع الأشياء الصغيرة. تنظر إلى الاضطراب في السوائل: إنها تراكيب مُعقّدة، وقد انبثق تعقيدها من عملية ثابتة. فعند مستوى ما، لا يعود حجم تلك العملية مهماً، سواء بحجم حبة البازلاء أو كرة السلة. لا تهتم تلك العملية بالحجم، ولا تهتم بالزمن الذي تستمر فيه. المهم هو الشيء الشامل، وبمعنى ما، المهم هو ما يعبر خلال المقاييس كلها.

بطريقة ما، يشكّل الفن نظرية عن نظرة البشر إلى العالم. ومن الواضح أن الانسان لا يُدرك التفاصيل كلها. ما صنعه الفنانون يتمثّل في إدراكهم أن الأشياء المهمة قليلة، ثم اشتغلوا عليها. لذا، في إمكانهم إنجاز الكثير من البحوث التي أكبّ عليها. عندما تنظر إلى الأعمال المُبكرة لفان غوغ، ترى أنه يمكن وضع ملايين التفاصيل فيها، وأن لوحاته تحتوي على ملايين المعلومات. والأرجح أنه فكر في استخلاص الأشياء التي لا يمكن أن تُختزل من بين تلك التفاصيل الهائلة. في الإمكان درس اللوحات التي يظهر فيها الأُفق عند الرسامين الهولنديين في القرن السابع عشر، حيث تتجمع أشجار وأبقار بأحجام صغيرة جداً. إذا أمعنت النظر، ترى الأشجار وكأنها تملك حدوداً ترسمه الأوراق المتعرجة، لكنها لا تُرسم بمكوّناتها كلّها، بل تُمثل بأشكال متنوعة. ثمة تفاعل مستمر بين البُنى الدقيقة الناعمة وبين الخطوط القوية والواضحة. وبطريقة ما، يُعطي المزيج انطباعاً بصرياً بأن ما تراه يمثّل العالم الواقعي الذي تعايشه فعلياً. اهتم رسامون آخرون بالمياه وتراكيبها. إن حدّقت في طريقة رسمها، تخرج بانطباع أنها خُطّت بالإكثار من التكرار. هناك أشياء على مقياس مُعين، وأشياء على مقياس آخر يُضاف إليه، ثم تُجرى تصحيحات على ذلك.

وبالنسبة إلى أولئك الرسّامين، شكّل الاضطراب في السوائل شيئاً له علاقة مع المقاييس. «أُريد حقاً أن أتوصل إلى طريقة لوصف الغيوم. ولكنني أعتقد بأن من الخطأ

وصفها بالقول إنها تتألف من قطعة ذات كثافة مُعيّنة هنا، وقطعة من كثافة أُخرى هناك. لا نرى الغيوم بهذه الطريقة. ولا ينظر اليها الفنانون بتلك الطريقة أيضاً. في مكان ما، تفشل المُعادلات التفاضلية الجزئية في وصف الغيوم. كأنما العالم ينطوي على وعد غامض بوجود أشياء جميلة فيه، أشياء مُحيّرة ومغرية. لذا فإنها تولّد فيك الرغبة في فهمها».

يضعُ فايينبوم سيجارته. يطفئها. يرتفع دخان من المرمدة. يرسم العمود الأول خطاً رفيعاً، ثم (وتماماً كما تتوقع «النظرية الشاملة») يتكسّر العمود إلى حلقات تُدوِّم متجهة نحو السقف.

العالِمُ التجريبي

إنها تجربة لا تُشبه أي تجربة أُخرى خبرتها. إنها أفضل ما يمكن أن يحدث لعالِم: «تلك اللحظة التي يعبر خاطر ما في عقله ثم يُلاحظ أنه يماثل بالضبط ما يحدث في الطبيعة. إنها مُدهشة في كل مرّة. يُدهش المرء بأن تركيباً ما صنعه دماغه يستطيع أن يُعبّر بأمانة كليّة عما يحدث في العالم الخارجي، أي صدمة كبرى وأي فرحة كبرى».

ليو كادانوف

«لقدُ نضج ألبرت». هكذا سار القول في «إيكول نورمال سيبريور» وهي الأكاديمية التي تعتبر، إضافة إلى «إيكول بوليتكنيك»، القمة في النظام التعليمي الفرنسي.

وتشي تلك العبارة بقلق قائليها على أثر العمر على ألبرت ليبشابيه، الذي ذاع صيته عالماً مميزاً في مجال فيزياء الحرارة المتدنية. إذ اشتُهر بدراساته عن تطبيق قوانين الفيزياء الكمومية على الهيليوم الفائق السيولة عند برودة تُساوي الصفر المُطلق الذي يُساوي ٢٧٣ درجة مئوية تحت الصفر. وفي العام ١٩٧٧، أخذ في تبديد وقته، إضافة إلى تبذيره موارد الكلية، على تجربة بدت فائقة التفاهة. وقد تساور القلق ليبشابيه نفسه بشأنها، فامتنع عن الاستعانة بالطلبة الموشكين على التخرّج لكي لا يُهدد فشل التجربة مستقبلهم المهني. وعمد إلى الاستعانة بمهندس محترف...

قبل خمس سنوات من الغزو النازي لباريس، وُلِدَ ليبشابيه في عائلة يهودية من بولونيا، وكان حفيداً لحاخام يهودي. ونجا من الحرب الثانية بطريقة تُشبه ما فعله بنواه ماندلبروت؛ أي بالاختباء في الأرياف بعيداً من والديه اللذين قد تفضحهما لكنتهما البولونية الفاقعة. ونجا والداه أيضاً؛ فيما هلكت بقية الأُسرة على يد النازيين.

وفي مفارقة سياسية هائلة، جاءت نجاة ليبشابيه بفضل حماية من ضابط شرطة في حكومة بيتان، تميّز بأن ميوله اليمينية المتطرفة لم تحُل دون بُغضه الهائل للتمييز العنصري، على عكس الحال تقليدياً في اليمين الفرنسي. وبعد الحرب، استطاع الصبي ذو العشر سنوات أن يردّ الجميل. فقد أدلى بشهادة، لم يكن على دراية كافية بأبعادها، عن حسن معاملة الضابط له، أمام لجنة تحقيق بجرائم الحرب. ونجا الضابط.

صعد نجم ليبشابيه في الأوساط العلمية الفرنسية، بفضل ذكائه الحاد. واعتقد بعض

زملائه أحياناً بأنه على شيءٍ من الجنون، خصوصاً أنه بقي على إيمانه الديني فيما تميزّت الأوساط الأكاديمية الفرنسية بعلمانيتها؛ وساند الخط السياسي للجنرال شارل ديغول في وقت مال فيه معظم من حوله إلى الشيوعية. وسخروا من إعجابه بنظرية «الرجال العظام يصنعون التاريخ»، ومن تعلقه بموسيقى غوته، ومن افتتانه بشراء الكتُب القديمة. فقد امتلك مئاتُ النسخ الأصلية من مؤلفات علمية ترجع إلى القرن السابع عشر.

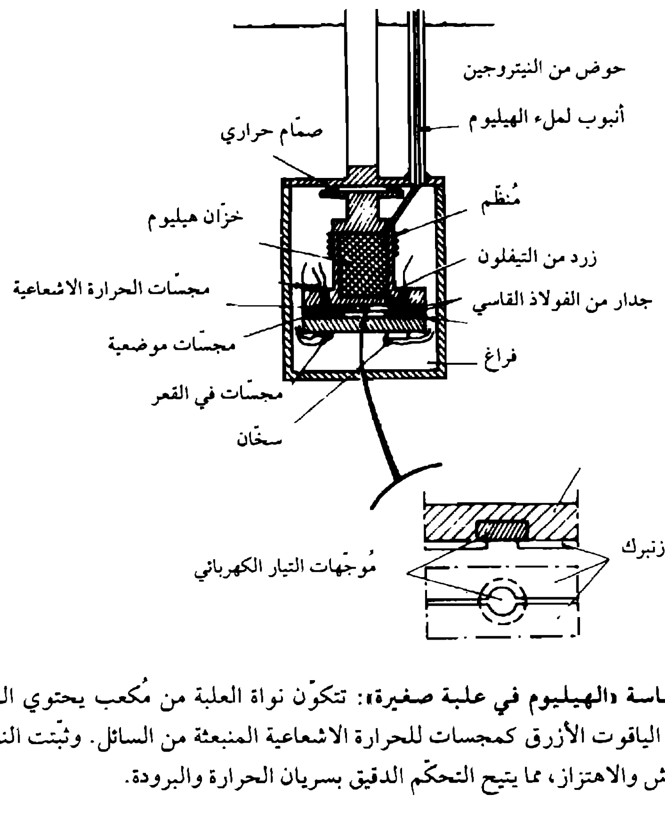
والغريب أنه لم يقرأها بسبب ميله الفضولي إلى التاريخ، بل اعتبرها مصدراً لأفكار جديدة عن الحقيقة فعلياً؛ تلك الحقيقة عينها التي حاول سبر غورها في تجربة استعمل فيها حزم الليزر والتكنولوجيا الأكثر تقدماً في مجال التبريد الفائق. ولمس لدى مُساعده المهندس جان موريه، روحاً مماثلة. فقد عُرف عن موريه أنه يعمل فقط إذا أحب ما يشتغل عليه. وظن ليبشابيه أن موريه سيجد تلك التجربة مُسليّة. وفي العام ١٩٧٧، انغمس الرجلان في تجربة أدّت إلى اكتشاف الطريقة التي يبدأ فيها الاضطراب بالظهور.

وكعالِم تجريبي، بدا ليبشابيه وكأنه صورة عن علماء القرن التاسع عشر بعقله اليقظ، وتمكّنه من العمل في المختبر بيديه، وميله للبراعة والفطنة كبديل من القوة. ولم يستسغ التكنولوجيا الضخمة، بما فيها الكومبيوترات الكبيرة. وتُماثل فكرته عن التجربة الجيدة صورة البرهان الجيّد في الرياضيات. وأعطى الأناقة في البحث العلمي شأناً موازياً لنتائجه. وعلى الرغم من ذلك، حدس بعض زملائه أنه يذهب بعيداً في تلك التجربة عن انبثاق الاضطراب.

فقد تركزّت التجربة كلها في علبة صغيرة يمكن وضعها في الجيب، كولاعة السجائر. ولم يتردّد ليبشابيه في حمل تلك العلبة معه أحياناً، وكأنها قطعة من الفن التجريدي. وسمّاها «الهيليوم في علبة صغيرة». وزاد في المفارقة أن نواة تلك التجربة أصغر من ذلك بكثير. ولا تزيد على حجم بذرة ليمون منحوتة من الفولاذ القاسي. واحتوت تلك النواة على سائل الهيليوم المُبرّد إلى أربع درجات فوق الصفر المُطلق، وهو ما يُساوي ٢٦٩ درجة مئوية تحت الصفر. وتعتبر «دافئة» قياساً على تجارب سابقة لليبشابيه عن التبريد

الفائق للسوائل! احتل مختبره جزءاً من الطابق الثاني في مبنى الفيزياء في الـ«إيكول»، على بُعد أقل من مئة متر من المختبر القديم للعالم الفرنسي الشهير لويس باستور. ومثل الكثير من المختبرات العامة للفيزياء، ظل في حال شبه دائم من عدم الترتيب. فانتشرت فيه علب الدهان وأدوات العمل اليدوي متمازجة مع قطع البلاستيك والمعادن. وظهرت تلك العلُبة الصغيرة لتجربة ليبشابيه وكأنها رمز للنظام في تلك الفوضى العارمة. إذ استندت نواتها الفولاذية إلى قاعدة من النحاس النقي جداً. وثبّتَ فوقها سقفاً من الياقوت الأزرق. واختار ليبشابيه تلك المواد بحسب قدرتها على نقل الحرارة.

واحتوت لفائف معدنية للتسخين الكهربائي وزرداً من مادة التيفلون. ويسيل الهيليوم إلى النواة من خزان صغير فوقها، لا يزيد حجمه على عقلة الإصبع. وأُحيط ذلك التركيب



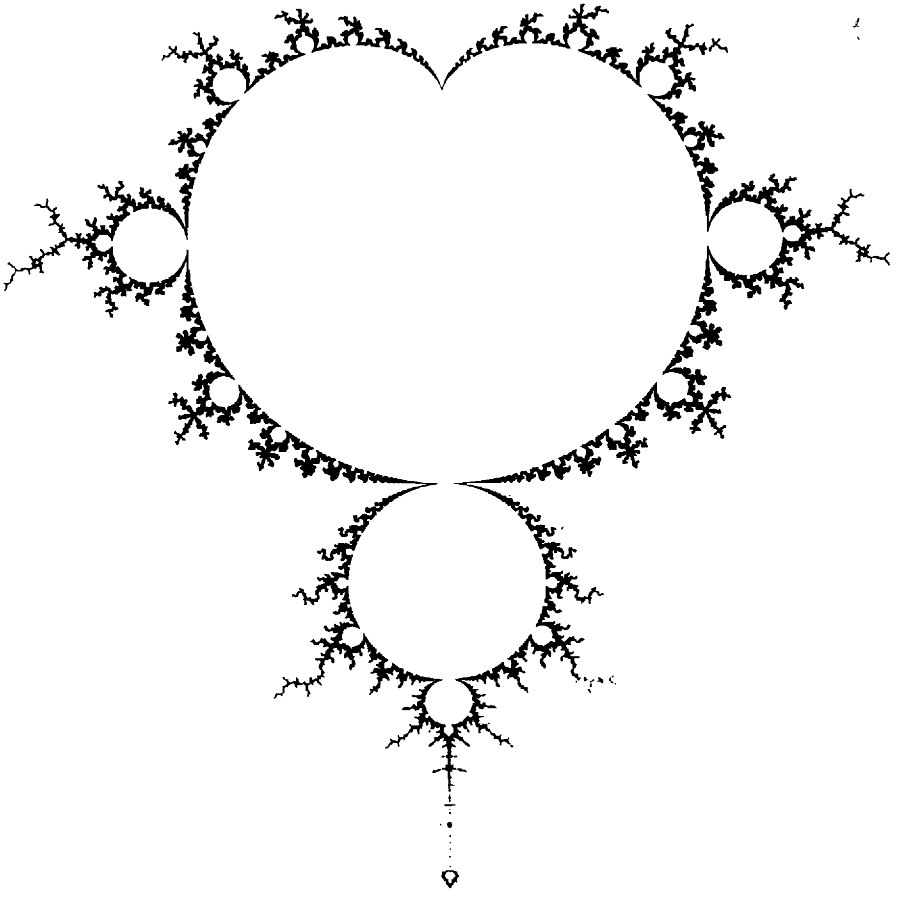
تجربة ألبرت ليشابيه الحسّاسة «الهيليوم في علبة صغيرة»: تتكوّن نواة العلبة من مُكعب يحتوي الهيليوم السائل؛ وتعمل قطع صغيرة من الياقوت الأزرق كمجسات للحرارة الاشعاعية المنبعثة من السائل. وثبّتت النواة في غلاف صُمّم ليحميها من التشوش والاهتزاز، مما يتيح التحكّم الدقيق بسريان الحرارة والبرودة.

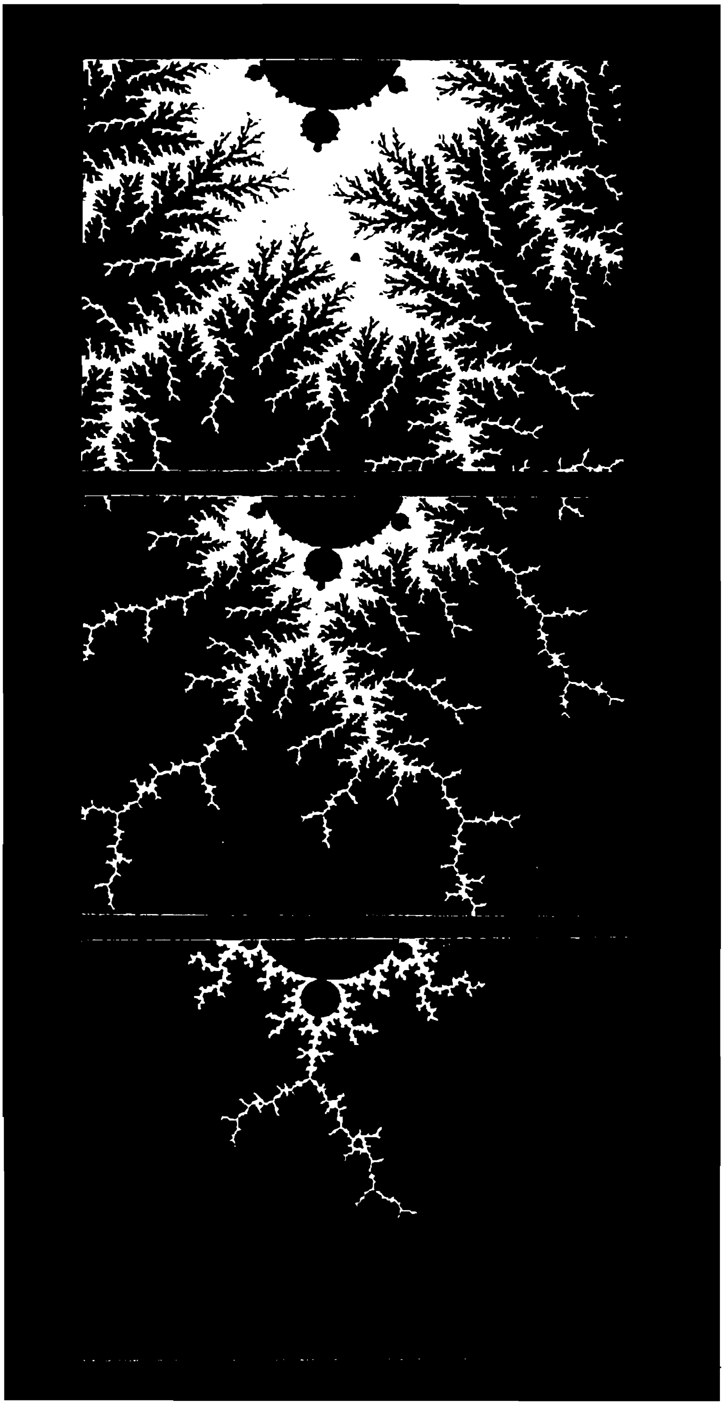
بخزان مُفرّغ من الهواء إلى الحد الأقصى، لضمان عزل البرودة. وأحيط ذلك الخزان أيضاً بحوض من النيتروجين السائل، الذي يساعد في تثبيت البرودة الفائقة أيضاً. وأثار الاهتزاز اهتمام ليبشابيه دوماً. فقد أُجريت التجارب الفيزيائية على نُظُم واقعية للحركة اللاخطية، ضمن مستوى مُعين من التشوّش. وعوّق التشوّش أيضاً التوصّل إلى قياسات دقيقة. وكذلك خرّب معلومات التجارب. وفي حالات التدفّق الحسّاس، يبعث الاهتزاز باضطراب قوي للتدفق اللاخطيّ، فينقله من سلوك إلى آخر. ولكن الحركة اللاخطيّة باستطاعتها أن تبعث الاستقرار في النظام، تماماً كقدرتها على اثارة الاضطراب فيه. إذ تؤدي التغذية الراجعة اللاخطيّة إلى تثبيت النظام وجعله أكثر استقراراً. إذاً، ففي النُّظُم الخطيّة، يرتبط الاضطراب دوماً مع حال من عدم الاستقرار.

أما في ظل النُّظُم اللاخطيّة، فإن الاضطراب قد يتغذى من نفسه بحيث يتلاشى، فيسير النظام تلقائياً إلى الحال الثابت.

وآمن ليبشابيه بأن النُّظُم البيولوجية تستعمل خاصية اللاخطيّة لكي تحمي نفسها من التشوّش. وبذا تُعزل حركات كثيرة في الجسم، مثل انتقال الطاقة في البروتينات والحركة الموجية لكهرباء القلب وكهرباء الجهاز العصبي، من التشوّش الخارجي.

وسعى إلى إيجاد نظام لنقل الحرارة بالحمل في الهيليوم السائل من طريق جعل قعر النواة أكثر سخونة من سقفها. وتشبه تجربته تجربة إدوارد لورنز، التي ارتكزت على نظام تقليدي يُعرف باسم «نظام رايبله ـ برنارد لنقل الحرارة بالحمل». وحينذاك، لم يكن ليبشابيه مُطّلعاً على ما أنجزه لورنز. وكذلك لم يعلم بأي من أفكار ميتشل فايينبوم ونظريته الشاملة. ففي العام ١٩٧٧، ابتدأ فايينبوم في السفر لنشر أفكاره في المجتمع العلمي. وعُرفت أفكاره حيثما وُجد من يستطيع فهمها وشرحها. ولم يعتقد معظم الفيزيائيين بوجود رابط بين الأنماط والمنتظمات التي ابتكرها فايينبوم وبين ما اختبروه واقعياً. ورأوا أن تلك الأنماط تأتي من الحاسبات الإلكترونية، في حين بدت النُّظُم الفيزيائية أشد تعقيداً. وفي غياب البراهين





المناسبة، بدت رسوم فايينبوم وكأنها تشبيه رياضي على حقيقة ما يحصل عند بدء الاضطراب.

وعلم ليبشابيه أن التجارب الفرنسية والأميركية قد أوهنت فكرة لانداو عن انبثاق الاضطراب، لأنها برهنت أن الاضطراب يأتي على هيئة حال انتقالية مفاجئة، وليس كتراكمٍ مستمر لترددات مختلفة. وأظهر علماء تجريبيون، مثل جيري غولوب وهاري سويني التي استعملت الأسطوانات الدوّارة في صنع الاضطراب، ضعف نظرية لانداو، وضروة إيجاد نظرية جديدة بدلاً منها. ولم يتمكن غولوب وسويني من وصف تفاصيل حال الانتقال إلى الفوضى. وقد علم ليبشابيه بغياب صور واضحة تجريبياً عن بداية الاضطراب، لذا قرّر أن يصنع تلك الحال في علبته الصغيرة، وبأقصى دقّة ممكنة.

يُساعد التدقيق في استمرار التقدم العلمي. وبذا، ربما كان العلماء على حق حين شكّكوا في مستوى الدقة في تجربة غولوب وسويني عن «تدفق كوويت ـ تايلور». وحُقّ لعلماء الرياضيات أيضاً، من وجهة نظرهم، أن يلوموا ديفيد رييال، على مخالفة قوانينهم. فقد اقترح نظرية جديدة وطموحة في علم الفيزياء جاءت على هيئة قوانين رياضية مُحكمة. ولم يكن من المستطاع فصل ما افترضه عما برهنه.

ثمة دور إيجابي لعالم الرياضيات المتشدد الذي يُصرّ على رفض الأفكار التي لا تسير وفق نظام: نظرية وبرهان ثم نظرية وبرهان؛ لأن تشدّده يمنع الادعاء والتزييف والأوهام. وكذلك الأمر بالنسبة إلى مدير تحرير المجلة العلمية الذي يرفض نشر ورقة علمية تحمل أفكاراً جديدة لم تسر وفق الأساليب العلمية المكينة؛ فذلك يحول دون نشر الأفكار غير المُثبتة تجريبياً. لذا، اقتنع ليبشابيه أن العلم صُمِّم أيضاً ليقي نفسه من التفاهة والعبث. وزاد ذلك الاقتناع في إضفاء المزيد من الغموض على شخصية ليبشابيه.

والحق أنه عالم تجريبي حذر ومُنظّم وصارم بشأن المادة التي يتعامل معها. وفي المقابل، مال ليبشابيه ميلاً أصيلاً نحو التجريدي والغامض والمُلتبس، مثل ذلك الشبح المُسمى تدفقاً. يمتلك التدفق مظهراً لكنه يتبدل. ويجمع الشكل والحركة. عندما يتعمّق

الفيزيائي في فهم نُظُم المُعادلات التفاضلية، يسمي حراك عالم الرياضيات تدفقاً. يحمل التدفق شيئاً من أفكار أفلاطون الذي افترض أن التبدّل في النُّظُم له علاقة مع حقيقة ما مستقلة عن زمن حدوث التبدّل نفسه. وآمن ليبشابيه بفكرة أفلاطون عن أشكال خبيئة تملأ الكون. ويتحدث عن ذلك بالقول: «تعلم أن الأشكال موجودة. أنت ترى إلى الأوراق، ألا يصدمُك أن تصاميمها الأصيلة قليلة العدد؟ باستطاعتك بسهولة أن ترسم الأشكال الأساسية. من المثير تأمّل هذه الأشياء. فلنأخذ تجارب أُخرى.

«تراقب دخول سائل في سائل آخر». يقطع كلامه ليُظهر صوراً عن ذلك التداخل، إذ تظهر تشعّبات تكرارية ومتغيّرة. يكمل: «في المطبخ. تشعل الغاز. تُراقب اللهب يتراقص في أشكال مُشابهة لما رأيته في السوائل. تلك الأشكال منتشرة على نحو شامل. ليس مهماً إن تَعلّق الأمر باحتراق الغاز أو بامتزاج السوائل أو بتراكم بلورات صلبة؛ عليك تأمل الأشكال... منذ القرن الثامن عشر، ساد نوع من الهجس بأن العلم لا يتنبه لتطور الشكل في الفراغ والزمان. تستطيع أن تُفكر في التدفق بطرق كثيرة، مثل تدفق الأموال أو تدفق الزمن. في البداية يسير متراكباً، ثم يتفرع إلى أشكال أكثر تعقيداً وربما إلى ذبذبات. ثم يغدو فوضوياً».

والحق أن مُعادلات التفاضل والتكامل، ومثلها مُعادلات الفرق اللوجستي، بدت قاصرة عن وصف شامل للأشكال، والتشابه عبر المقاييس، والتدفقات ضمن التدفقات.

ولم يكن سهلاً إدراك ذلك القصور. إذ تُصاغ المسائل العلمية في اللغة العلمية السائدة. وفي القرن العشرين، بدت رؤية ليبشابيه عن التدفق وكأنها تحتاج إلى لغة الشعر. فقد شدّد الشاعر واليس ستيفنز على إحساس بالعالم فاق تصورات الفيزياء له. وامتلك حدساً خاصاً عن التدفق، وأنه يُكرّر نفسه أثناء تبدّله:

«ترقرق النهر
الذي يتدفّق باستمرار، ولا يتدفق بالطريقة نفسها مرتين،
تدفّق عبر أماكن كثيرة، وكأنه يتوقف في كل منها».

وكثيراً ما خالطت رؤية ستيفنز الشعرية صور عن هيجان الماء والهواء. وتعكس إيماناً بالأشكال غير المرئية التي يتخذها الانتظام في العالم. إذ اعتقد بأن:

«في الهواء الذي لا ظل له،
تختبئ معرفة الأشياء، فلا يراها أحد».

وفي سبعينات القرن العشرين، إذ شرع ليبشابيه وآخرون في تقصّي تدفّق السوائل وحركتها، فإنهم فعلوا ذلك مدفوعين باحساس شاعري عن ضرورة التغيير الجذري.

وراودهم أن ثمة علاقة بين الحركة والشكل الشامل. وراكموا معلومات كثيرة بالطريقة الوحيدة التي أُتيحت لهم، أي بالكتابة على الورق أو تخزين المعلومات في الكومبيوتر. لكنهم سعوا إلى تنظيم تلك المعلومات في طريقة جديدة باستطاعتها إظهار تلك الأشكال. وساورهم أمل بأن يعبروا عن تلك الأشكال بالحركة. واقتنعوا بأن الأشكال الديناميكية، مثل اللهب، والأشكال العضوية مثل الأوراق؛ إنما «تستعير» أشكالها من قوة هائلة وغير مكتشفة. إن أولئك التجريبيين، الذين لاحقوا «نظرية الفوضى» (الكايوس) بلا كلل، نجحوا برفضهم قبول الحقائق التي يُعبّر عنها في صورة جامدة. ولعل الشاعر واليس ستيفنز عبّر عما يجول في خاطر ليبشابيه عندما تحدث عن «التموجات غير الصلبة للمواد الصلبة»:

«فوران المجد يتموّج في العروق،
فيما الأشياء تنبثق وتتحرك ثم تتبدّد.
وسواء في المسافة أو الحراك أو العدم،
ثمة تحوّلات مرئية لليلة صيف.
تجريد فضي لشكل يدنو
ثم فجأة ينكر نفسه ويغيب».

لقد أعطى غوته، وليس واليس ستيفنز، الكثير من الإلهام الغامض لليبشابيه. وفي الوقت الذي انهمك فايينبوم في البحث عن كتاب «نظرية الألوان» لغوته، عثر ليبشابيه على مؤلف آخر لغوته هو «عن تحوّلات النبات». الذي يمثّل محاولة فريدة من غوته لحض

الفيزيائيين على تجاوز التفكير في الظواهر الساكنة، للتأمل في القوى الحيوية والتدفقات التي تُنتج الأشكال التي تملأ الكون فعلياً. تمثّل جزء من إرث غوته، أقل كثيراً مقارنة بظلّه الأدبي الهائل، في تقليد شبه علمي، حافظ عليه بعض الفلاسفة مثل رودلف شتاينر وثيودور شوينك. وقد أُعجب ليبشابيه بهذين الفيلسوفين، على طريقته كفيزيائي.

إذ استخدم شوينك عبارة «الكايوس الحسّاس» في وصف العلاقة بين القوة والشكل، وجعلها عنواناً لكتاب صغير وغرائبي، نشر أولاً في العام ١٩٦٥، ثم طبع مراراً. تطرق الكتاب إلى الماء.

وتضمّنت النسخة الإنكليزية مقدمة مفعمة بالإعجاب للقبطان الفرنسي الراحل ايف كوستو، إضافة إلى شهادات تقدير من مطبوعتي «دورية المصادر المائية» و«مجلة مؤسسة مهندسي المياه». اشتمل الكتيب على بعض النقاش شبه العلمي، ولم يتضمن أي شيء من الرياضيات. وعلى الرغم من ذلك، بدت ملاحظاته دقيقة. وعرض مجموعة من الأشكال المتغيّرة في الطبيعة، منظوراً اليها بعين فنان. وجمع صوراً فوتوغرافية، وكثيراً من الرسوم، مثل رسم الخلية تحت الميكروسكوب. لقد امتلك مزيجاً من السذاجة والانفتاح العقلي، من النوع الذي راق غوته دوماً.

يملأ التدفق تلك الصفحات. وتتلوى الأنهار الكبرى وأحواضها، مثل نهر «المسيسيبي» في أميركا وحوض «أركاشون» في فرنسا، في منحنيات كبرى، قبل أن تصب في البحر. وتتعرج شواطئ منطقة الخليج على الشاطئ الأطلسي لأميركا، بصورة لولبية، محتضنة مصب «المسيسيبي» بالمياه الدافئة التي تسير لملاقاة المحيط البارد. ويصفه شوينك بأنه «النهر الذي يصنع ضفافه من المياه الباردة». ويتلاشى التدفق، ولا تذوي آثاره. وتترك أنهر الهواء علاماتها على الصحراء على شكل تموّجات. ويصنع المدّ شبكة من عروق الماء على الشاطئ. ولم يؤمن شوينك بالمصادفة.

وحدس بوجود مبادئ شاملة، بل بروح كامن في الطبيعة، وهذا ما ملأ نثره بالميل إلى أنسنة الجماد. ويتمثل «مبدأه الأعلى» بالقول إن «التدفق يحاول تحقيق ذاته، بغض النظر

عن المواد المُحيطة به». وعرف أن تيار الماء الجارف تُصاحبه تيارات ثانوية. وتسير مياه النهر متعرجة حول محوره ومتقلبة بين ضفتيه، ومتنقلة بين السطح والقعر، كأنها جُسيم يترك في شكل لولبي حول كعكة مُحلاة. إذا رُصد جُسيم من الماء، فسيرسم أوتاراً تتلوى حول أوتار. امتلك شوينك خيالاً طوبولوجياً عن هذه الأشياء. وبحسب تعبيره: «تنطبق هذه الصُورة عن أوتار تتلوى بشكل لولبي على الحركات الفعلية. لا يتعلق الأمر بـ«أوتار» من الماء، بل بأسطح مائية برمتها، تتداخل تموجاتها ويسبق بعضها بعضاً». لقد رأى إيقاعات في تلك الأمواج المتنافسة، موجة تستولي على الأُخرى استيلاء يُقسّم الأسطح ويزيل الحدود بين الطبقات. ورأى دوامات وسلاسل من تحويمات، كأنها «تدحرج» سطح في بطن آخر. ولامست أوصافه الفلسفية الحدود التي تصل اليها فيزياء النُّظُم الديناميكية عند وصفها حال الانتقال إلى الاضطراب. وافترض حدسه الفني وجود الشاملة.

وبالنسبة لشوينك، تساوت الحوّامات مع فكرة عدم الاستقرار التي تعني أن التدفق يقاتل اللامساواة، بل «المثال الأعلى» للامساواة، المستقرة في بواطنه. ورأى مساراً موحَّداً لدوران الحوّامة في الماء، لثنيات أوراق السرخس، ولتعرج الجبال، ولتجاويف أعضاء الجسد. وبغض النظر عن الوسط التي تحدث فيه تلك الظواهر، ثمة مبدأ شامل يربطها، أو بالأحرى يتمظهر فيها. يمكن اللامساواة أن تنشأ من تناقض السرعة مع البطء، والحار مع البارد، واللزج مع السائل، والحمض مع القلوي. وعلى حدود تلك الأشياء، تتبرعم الحياة.

وفي العام ١٩١٧، اهتم عالم الطبيعة دارسي وينتورث طومبسون بوصفها. فكتب: «من المحتمل أن قوانين الطاقة كلها، وخصائص المواد جميعها، والكيمياء برمتها تعجز عن وصف الجسد الحي، كمثل عجزها عن اكتناه الروح». أضاف دارسي طومبسون إلى علم الطبيعة الشيء الذي افتقده شوينك بشدّة: الرياضيات. استندت محاجّة شوينك إلى رصده للتشابه. وتنتهي كلماته عن الأشياء التي رصدها إلى إظهار التشابه بينها. ولقد

استمد دارسي طومبسون، في مؤلفه المهم «عن النمو والشكل»، أشياء كثيرة من ذائقة شوينك ومنهجيته أيضاً.

وقد يحار القارئ المُعاصر في تقويم تلك الرسوم الفائقة الدقة لنقاط الندى المتشعبة الشكل المُعلقة على حوافي الأزهار، والتي تُشبه قناديل البحر المرسومة بجانبها. أهي مجرد مُصادفة؟ ألا يفترض تشابه الشكلين وجود «سبب ما» يجمعهما؟

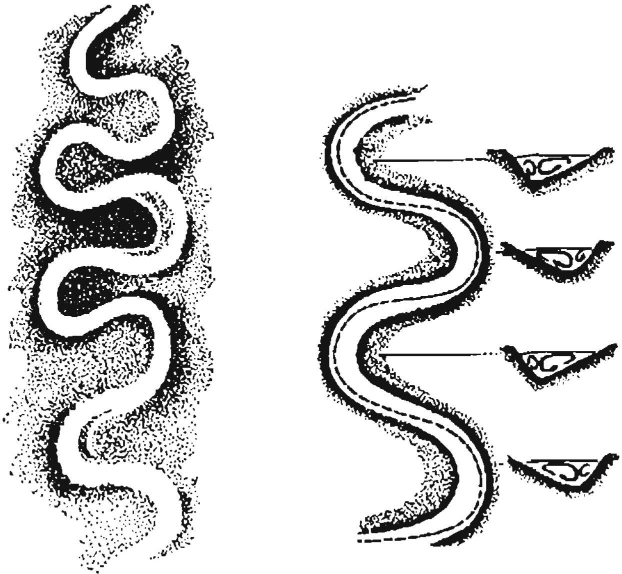
يُنظر إلى دارسي طومبسون باعتباره من أبرع الوجوه التي غيّبتها ثورة البيولوجيا في القرن العشرين، والتي تجاوزته بسرعة البرق. لقد أهمل الكيمياء (التي أثبتت أنها رافد قوي للبيولوجيا عند اكتشاف الحمض النووي الوراثي)، وأساء فهم الخلية (وقد ارتكزت ثورة البيولوجيا برمتها على التعمّق في التراكيب الداخلية للخلية)، ولم يستطع توقع الآفاق التي تحملها الجينات (التي حوّلت علم البيولوجيا جذرياً). وحتى عند تألّقه، نُظر إلى كتاباته باعتبارها تقليدية وملأى بالنثر الأدبي الجميل، مما أضعف النظرة العلمية اليها.

لا ينظر أي عالم بيولوجيا معاصر نظرة جادة إلى أعمال دارسي طومبسون. ومع ذلك، فإن حفنة من البيولوجيين العظام تأثّرت بكتبه.

ووصفه السير بيتر مُدوّر، الحائز جائزة نوبل للبيولوجيا، بالقول: «تصعب مقارنة كتاب طومبسون بأي كتاب علمي مماثل وُضع باللغة الإنكليزية».

واعتبره عالم الإحاثة (بالينتولوجيا: علم دراسة أصل الانسان) ستيفن جاي غولد مرجعاً للفكرة القائلة بالقيود الطبيعية على أشكال الأشياء. وفيما عدا دارسي طومبسون، أحجم معظم البيولوجيين عن محاولة رصد الوحدة الظاهرة في الكائنات الحيّة. وعبّر غولد عن ذلك بالقول: «حاول نفر قليل من العلماء السؤال عن إمكان اختزال الأنماط كلها إلى نظام وحيد من القوى الخلاقة... ولاحظت قلة منهم أيضاً الأهمية التي يعطيها إثبات وجود تلك الوحدة بالنسبة إلى العلوم العضوية».

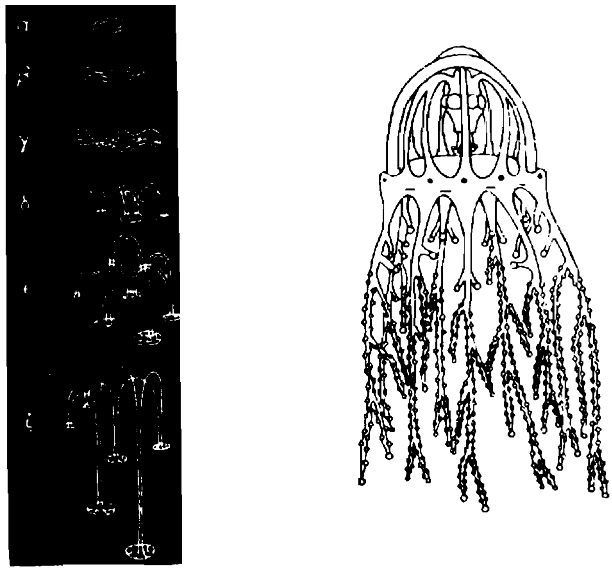
لقد حاول طومبسون، البيولوجي التقليدي والمتمكن من علم الرياضيات، أن ينظر



التدفق المتلوي والمتعرّج: ثيودور شوينك تخيّل تيارات التدفق الطبيعي على هيئة أوتار لها حركات جانبية مُعقّدة.[5] «إنها ليست مجرد أوتار ماء، بل أسطح مائية برمتها، تتداخل تموجاتها ويسابق بعضها بعضاً».

إلى الحياة من مختلف الجوانب. في الوقت الذي ركّز علماء البيولوجيا اهتمامهم على محاولة تقليص الكائنات إلى مكوّناتها الفاعلة. لقد انتصرت الاختزالية محققة إنجازات رائعة في بيولوجيا الوراثة، إضافة إلى الطب والأدوية والتطور وغيرها. وبعد، كيف يمكن فهم الخلايا من دون التعمق في درس الأغشية والأنوية، ووصولاً إلى البروتينات والأنزيمات والكروموزومات والجينات؟

وعندما تعمّقت البيولوجيا في فهم تركيب الجيوب الأنفية وشبكية العين والأعصاب وتركيب الدماغ، هجرت مسألة شكل الجمجمة. لقد مثّل دارسي طومبسون آخِر من حقق مثل تلك الدراسة. وكذلك جسّد آخِر جيل من البيولوجيين الذين صبّوا طاقتهم في محاولة فهم سبب الظاهرة البيولوجية، وخصوصاً للتمييز بين السبب النهائي والسبب الفيزيائي. ويُعرّف السبب النهائي بأنه المتعلق بالهدف الذي يُحققه تصميم ما. يمتلك الدولاب شكلاً دائرياً لأنه الشكل الذي تُصبح المواصلات معه ممكنة. وأما السبب



القطرات المُعلّقة: أظهر دارسي وينتورث طومبسون الخيوط المُعلّقة والأعمدة التي تصنعها قطرة حبر عند ارتطامها بالماء (إلى اليسار). وقارنها بشكل قنديل البحر (إلى اليمين). «إنها نتيجة مثيرة...تظهر حساسية تلك النقاط للظروف الفيزيائية. وباستعمال الطلاء عينه، مع تغيير الكثافة، يمكن الحصول على مجموعة من الأشكال، من القطرة المُعلقة إلى النسق المُشرشر...».

الفيزيائي فهو ميكانيكي: إن الأرض كروية لأن الجاذبية تشد الوسط السيّال إلى شكل كروي. ولا يكون الفارق بين السببين واضحاً دائماً. تُصنع كؤوس شرب الماء على هيئة مستديرة لأنها أكثر الأشكال ملاءمة لحملها والشرب منها. وأيضاً لأنها الشكل الذي تميل إليه الأشياء في صناعة الخزف والزجاج.

في العلم عموماً، يهيمن السبب الفيزيائي. فمع خروج الفلك والفيزياء من عباءة الفلسفة والدين، أُهملت النقاشات الفلسفية المتعلّقة بالتصميم، وساد نوع من «الفلسفة» المباشرة: إن الأرض هي كما هي لكي تفعل عليها الإنسانية ما تفعله عليها. وفي البيولوجيا، أسس داروين لاعتبار الفلسفة بؤرة للنقاش عن السبب، فلم يهتم بالتوافق مع الرؤية التوراتية لظهور الإنسان، بل ركز اهتمامه على التصميم البيولوجي الذي تولّد نتيجة الصراع على البقاء والانتقاء الطبيعي. لا تؤثر قوى الانتقاء الطبيعي على الجينات

أو الأجنة، بل على الكائن النهائي. لذا، مال التفسير المُرتكز على تكيّف الكائن مع محيطه، بحسب زعم داروين، للقول إن الأشكال والوظائف تتطابق مع هدفها، ليس الهدف الفيزيائي، بل الهدف النهائي. ويعلو صوت التفسير النهائي من هذا النوع في الدوائر التي تتبنّى طرق داروين في التفكير. فعندما يتأمل عالم سلالات ظاهرة أكل اللحم البشري أو تقديم القرابين، يُعطي الأولوية للسؤال عن الهدف الذي ساهمت في تحقيقه. ولقد أحسّ دارسي طومبسون بقرب هيمنة هذا الضرب من التفكير. ورجا أن يتذكر العلماء أهمية السبب الفيزيائي، أي فصله عن الهدف النهائي. كما لم ييأس من الدعوة للاهتمام بالسببين معاً، بدل اختصارهما في واحد. وكرس جهداً كبيراً لشرح القوى الفيزيائية والرياضية التي تؤثّر في الظاهرة الحيّة.

ومع سيطرة نظرية التكيّف، لم تعد تلك الشروح مهمة. صار الأكثر أهمية هو شرح كيف شكّل الانتقاء الطبيعي ورقة الشجرة لتكون نوعاً من لوح شمسي للطاقة. ومرّ وقت طويل قبل أن يعاود بعض العلماء الاهتمام مُجدّداً بالأسئلة التي لم تُعط الطبيعة تفسيراً لها. لم تأتِ الأوراق في أنماط محدودة من الأشكال، رغم الاحتمالات المفتوحة لتشكّلها، علماً بأن شكل الورقة لا يُملي وظيفتها.

إن الرياضيات التي توافرت لدى دارسي طومبسون لم تسعفه في إثبات ما سعى لإثباته. لذا، مال إلى الرسم. وأنشأ رسوماً لجماجم من أنواع حيوانية متقاربة، ليُظهر أن تحوّلاً بسيطاً في الشكل الهندسي يؤدي إلى الانتقال من نوع إلى آخر.

وبالنسبة إلى الكائنات الدقيقة التي تُذكر أشكالها بنفث السوائل أو «طرطشة» القطرات أو الأشكال الأُخرى من التدفق، فقد شك دوماً في أنها تُفسّر بالسبب الفيزيائي، مثل الجاذبية والتوتر السطحي للسوائل، الذي لا يتصل بالهدف من وجودها.

إذاً، لمَ عاد ألبرت ليبشابيه إلى كتاب طومبسون «عن النمو والشكل» عندما قرر الشروع في تلك التجربة عن السوائل؟

اقترب حدس دارسي طومبسون بصدد القوى التي تساهم في تشكيل الظاهرة الحيّة،

من أُفق النُّظُم الديناميكية. لقد فكر في الحياة كما هي، باعتبارها في حركة، وباعتبارها تستجيب لإيقاعات، وصفها بأنها «الايقاعات العميقة للنمو» التي رأى أنها تساهم في ظهور الأشكال ذات الطابع الشامل. واعتقد بأن الموضوع الرئيسي لدراسته لا يتمثّل حصرياً في الأشكال المادية للأشياء بل يشمل آلياتها الديناميكية. وبحسب رأيه: «(يجب التوصلُ إلى) تفسير لديناميكيات الطاقة ترتكز على مفهوم فيزياء للقوة». لقد برع في الرياضيات بحيث عرف أن تصنيف الأشكال لا يُجدي شيئاً. وفي المقابل، فإن حسّه الشعري قاده للتيقن بأن لا المصادفة ولا الهدف باستطاعتهما شرح النظرية الشاملة الهائلة في الأشكال التي جمعها عبر سنوات طوال من التأمل الصبور في الطبيعة. ورجح أن قوانين الفيزياء في امكانها ان تشرح تلك الظاهرة، وأن العلم لم يتوصل بعد إلى اكتشاف القوانين التي تهيمن على القوة والشكل. ربما تشي الكلمات بالعودة إلى أفلاطون، بمعنى الاعتقاد بأن ثمة ما يكمن خلف الأشكال المرئية للمادة، ويكون لها بمنزلة التصميم الخفي. إن الأشكال الشاملة هي أشكال في حركة دائمة.

اختار ليبشابيه الهيليوم السائل موضوعاً لتجربته، لأنه ضئيل الكثافة، بحيث يتموّج عند أدنى اهتزاز. وبكلام آخر، فلو اختار شيئاً متوسط الكثافة، مثل الماء أو الهواء، لاحتاج إلى صندوق كبير.

ومع الكثافة المتدنية، باتت تجربته شديدة الحساسية للحرارة أيضاً.

ولصنع موجات نقل الحرارة بالحمل في خلية مساحتها ميلليمترات، تعيّن عليه اصطناع فرق حراري، بين السطح والقعر، مقداره بضعة كسور من الألف من الدرجة. لذا، تحتّم أن تكون الخلية فائقة الصغر. وللمزيد من الشرح، فإن صغر الحجم يتيح تحكماً أكبر في التجربة. فلو كان حجم الخلية أكبر، لامتلك الهيليوم حيزاً أكبر للحركة بالتجاوب مع أدنى تغيير في الحرارة. ولو صُنعت الخلية بحجم حبّة عنب (أي أكبر بآلاف المرات) لتَحَرَّكَ الهيليوم في ظل فرق حراري يصل إلى كسر من المليون من الدرجة. إذاً، يفيد صغر الخلية في المزيد من التحكّم في الحركة. وصنع ليبشابيه

ومهندسه تلك الأداة بدقة هائلة، بحيث تنتفي عناصر التشويش كُلياً. تصوّر الفيزياء حركة السوائل، من الفيض الهادئ إلى الاضطراب، باعتبارها انتقالاً في فضاء المكان. وبذا، تظهر تعقيدها باعتباره تعقيداً مكانياً. وتوصف الدوّامات بأنها فوضى مكانية. وفي المقابل، سعى ليبشابيه لتقصي الإيقاعات التي تظهر باعتبارها انتقالاً في الزمان. واعتمد الزمن مقياساً. لقد قلّص المكان إلى الحدّ الأقصى، على غرار ما فعلته تجارب سابقة.

فللمثال، إن تجربة رايبله ـ برنارد، التي اصطنعت فوضى في سريان السوائل عبر أسطوانات دوّارة داخل مُكعب زجاج، تعتبر تجربة في حيّز ضيّق قياساً على تدفق الأمواج في البحار والمحيطات. ففي الحيّز المفتوح، يتضاعف التعقيد. وبما أن موجات نقل الحرارة بالحمل تسير في لفائف مثل النقانق، فإن الحيّز الذي صنعه ليبشابيه سمح بمرور موجتين. ترتفع الأمواج في الهيليوم السائل من الوسط، ثم تصعد إلى الأعلى، ثم تتقلب يساراً ويميناً، ثم تهبط من طرفي الخلية. لقد «اعتُقلَت» الهندسة، وقُيّد التقلّب. لقد جمّد ليبشابيه المكان لكي يتلاعب بالوقت.

وعند بداية التجربة، يتقلّب الهيليوم داخل خلية مُحاطة بمساحة مُفرغة مُحاطة بدورها بحوض من النيتروجين السائل. واحتاج ليبشابيه إلى أن يبتكر طريقة للنظر مباشرة إلى ما يحدث داخل الخلية.

وزرع مجسّين حراريين دقيقين في السقف الياقوتي للخلية، بحيث تنتقل اهتزازات الحرارة إلى آلة ترسمها على شكل خطوط بيانية.

وبذا حصل ليبشابيه على قياس للحرارة من نقطتين مختلفتين على سطح الهيليوم السائل. وبلغ تصميم تجربته من الدقّة والحذاقة إلى حد أن زملاءه وصفوها بأنها محاولة لمخادعة الطبيعة.

لقد استغرق صنع تلك الأداة الصغيرة الدقيقة ما يزيد على السنتين. وفي النهاية، استطاع أن يرى ما أراد رؤيته. وبتكرار التجربة، الساعة تلو الساعة، وجد ليبشابيه أن انبثاق الاضطراب يتضمن أنماطاً مُعقدة من السلوك، أكثر مما تخيّل. ظهر تجمّع من

الدورات المتضاعفة. لقد حاصر ليبشابيه حركة السائل الذي يرتفع عند تسخينه. تبدأ الحركة مع التفرّع الأول، أي عندما يسخن القعر المصنوع من النحاس الصافي، فيضيف إلى السائل طاقة تتغلّب على قدرة السائل على البقاء في وضع الاستقرار. وفي درجة البرودة التي أُجريت فيها التجربة، تكفي حرارة مقدارها كسر من الألف من الدرجة لكي تُحدث التسخين المطلوب. يسخن السائل عند القعر ويتمدد، فيُصبح أخف من بقية السائل. ولكي يرتفع السائل الحار، يجب أن يغوص السائل البارد. وبذا، ولكي يسمح بالحركتين معاً، يُنظّم السائل نفسه في أسطوانتين دوّارتين.

وعندما تصلان إلى سرعة ثابتة، يُصبح النظام متوازناً، بمعنى الوصول إلى توازن حركي؛ بحيث تتحوّل طاقة الحرارة إلى حركة وتتبدّد عبر الاحتكاك الذي يُعيد توليد تلك الطاقة الحرارية فتتسرب إلى السقف البارد.

عند تلك النقطة، لم يفعل ليبشابيه سوى تكرار تجربة معروفة في ميكانيكية السوائل، وهي معروفة حتى أنها أُهملت من الجميع. وبحسب رأيه: «هي فيزياء تقليدية، مما يعني أنها قديمة وغير مثيرة للاهتمام أيضاً». وكذلك يمكن القول إنها إعادة للنموذج الذي توصل اليه إدوارد لورنز في نظامه المبني على ثلاث مُعادلات. ولكن تلك التجربة، التي قلّدت الواقع بصورة فعلية وتجريبية، استطاعت أن تجمع من المعلومات ما يفوق المُحاكاة الإلكترونية للواقع على الكومبيوتر.

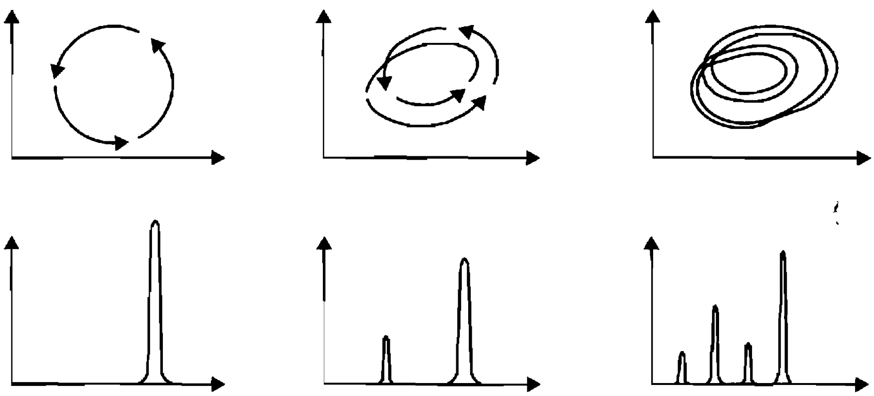
إن عالماً تجريبياً مثل ليبشابيه يستعمل الرسم البياني لتسجيل حرارة السقف، التي تُعبّر عن حرارة سطح السائل. وبعد التفرّع الأول، يصل النظام إلى ثبات درجة الحرارة فيه، فيرتسم خط مستقيم. مع استمرار التسخين، يظهر المزيد من عدم الاستقرار. وتظهر عقدة في كل من لفافتَي التحرّك. ثم تشرع العقد في التحرّك جيئة وذهاباً.

ويؤدي هذا الحراك إلى تغيير في حرارة السطح العلوي للسائل، فترتفع وتنخفض بين قراءتين. وترسم الأداة خطوطاً متموجة. لم يكن ممكناً قراءة الوقت الذي تحصل فيه التفرّعات الجديدة، ولا الخروج باستنتاجات تتصل بطبيعتها. فقد رسم الخط البياني

تقلّبات فيها ذُرى وانخفاضات، تُشبه تلك التي تحدث في الرسوم البيانية عن سوق الأسهم. وحلّل ليبشابيه تلك المعلومات بوضعها ضمن مروحة طيف من الخطوط البيانية، فاستطاع أن يفصل التردّدات الرئيسية المُضمرة في تقلّبات الحرارة. ويُشبه وضع الرسوم البيانية لهذه التجربة في طيف الخطوط البيانية، مثل تحليل الصوت الصادر من سمفونية لتحديد صوت وتر مُعيّن. وظهر خط غير متّصل ومهتزّ في أسفل تلك الرسوم؛ يُعبّر عن التشوش في التجربة. وبيّنت التجربة وجود تردّدات أساسية ظهرت على شكل ذُرى مرتفعة. وكلما زاد ارتفاع التردّد، زاد ارتفاع الذروة. وعند ظهور تردّد مسيطر، فإنه يظهر على هيئة ذرى تتكرر كل ثانية، ويمكن ملاحظتها بتحليل طيف الخطوط البيانية.

وفي تجربة ليبشابيه، ظهر أن أول التردّدات مدّته ثانيتان. ثم تلاه تفرّع أدى إلى تغيير طفيف وثابت. ثم تابعت الحرارة تقلّباتها، وسار رسم الخط البياني عنها في صعود وهبوط، مع وجود تردّد مُهيمن. وسرعان ما ظهر نمط لم يكن متوقّعاً. إذ تبيّن أن الذرى ذات العدد الفردي أعلى دوماً من الذرى ذات العدد الزوجي. والحق أن الذروة الموازية للحد الأعلى للحرارة انقسمت إلى اثنتين، بحيث ظهرت ذروتان مترافقتان مع هبوطين. وبكلام آخر، رسم الخط طفرة فوق طفرة، أي «طفرة عليا». وعلى طيف الخطوط البيانية، ظهر الأمر نفسه بطريقة أشد وضوحاً. في المقابل، تابع التقلّب الأساسي سيره، بمعنى صعود الحرارة وهبوطها كل ثانيتين. إذاً، فقد أُضيف إلى التقلّب الأساسي، عند منتصف تموجاته، فأظهر النظام إيقاعاً يتكرّر كل أربع ثوانٍ. ومع استمرار التفرّعات، أمكن تمييز نمط ثابت وغرائبي: تظهر ترّادت جديدة دوماً عند منتصف التموّجات السابقة. وهكذا، امتلأ الرسم البياني بالتموّجات التي تظهر عند كل ثمانية ثم عند كل ستة عشر وهكذا. وصار الرسم يشبه سياجاً ريفياً مُركباً تتناوب فيه الأعمدة الطويلة مع القصيرة.

وحتى بالنسبة إلى شخص مثل ليبشابيه، المُتدرّب العين على التقاط الأنماط المُخبّأة في أكوام المعلومات، اقتضى الأمر عشرات ومئات التكرارات، قبل التثبّت بوضوح من أنماط سلوك السائل في تلك الخلية الصغيرة.

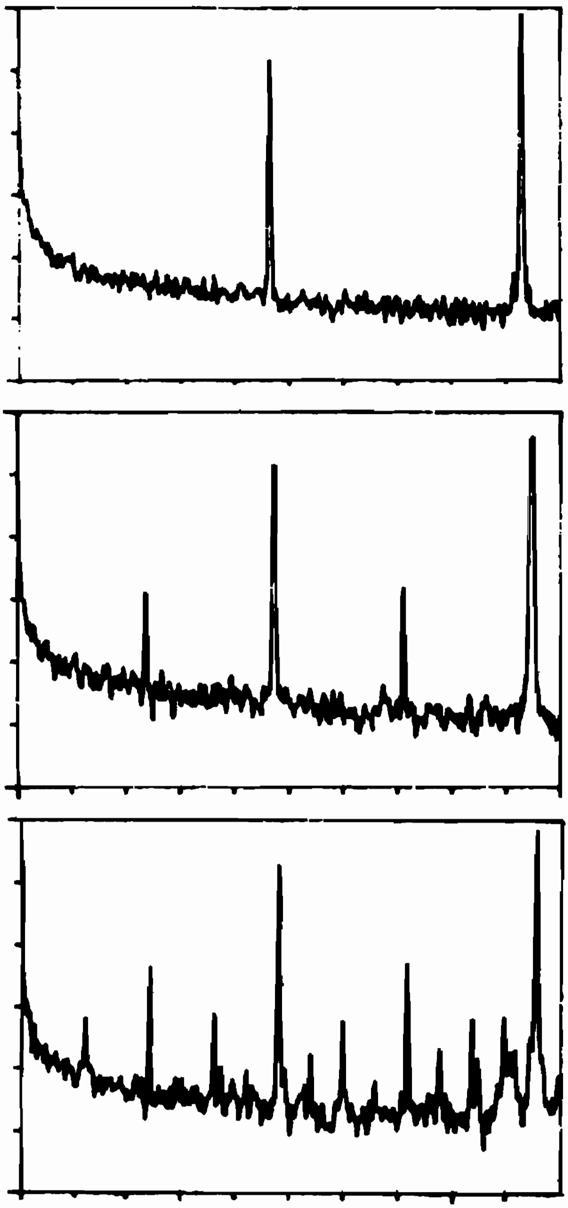


نظرتان إلى التفرّع: عندما تُنتج تجربة، كتلك التي سار بها ليبشابيه عن نقل الحرارة بالحمل، تذبذبات مستقرة، يُشبه حيز الفضاء الموازي لها الخط اللولبي الذي يُكرّر نفسه في أنماط منتظمة (أعلى اليسار). وعند قياس التردّدات، يرى العالم رسماً مع ذروة قوية في إيقاع وحيد. وبعد فترة من تضاعف دورة التفرّع، يدور النظام في مسار لولبي مزدوج ليكرّر نفسه تماماً (في الوسط). وعندها يرى العالم إيقاعاً جديداً عند منتصف التردّد الأصلي، أي بمقدار ضعف دورة التردّد. ثم يملأ تضاعف الدورات طيف الخطوط البيانية بالذرى المتكاثرة.

وحدثت أشياء غرائبية مع استمرار ليبشابيه ومُهندسه في رفع الحرارة بتؤدة، بالتزامن مع انتقال النظام من توازن مستقر على آخر. فقد ظهرت بعض التردّدات العابرة، التي تنزلق عبر الرسم البياني قبل أن تتلاشى تدريجاً. وأحياناً، تضطرب الهندسة الصافية، فتظهر ذروتان حيث يتوقع ظهور اثنتين. فكيف يمكن معرفة ما الذي يجرى حقاً في تلك الخلية الصغيرة؟

لو علم ليبشابيه، حينذاك، باكتشاف ميتشل فايينبوم للنظرية الشاملة، لعرف أين يبحث عن التفرّعات وكيف يسميها. ولكن، عند العام ١٩٧٩، لم تنل نظرية فايينبوم سوى اهتمام قلّة من علماء الرياضيات المُهتمين بالفيزياء. في حين مالت غالبية المشتغلين بمسائل النُّظُم الفيزيائية الفعلية، إلى موقف مترقب من تلك النظرية.

لقد أظهرت خرائط ميتشل فايينبوم وماي ظاهرة التعقيد في صور ذات بُعد واحد. والحق أنها بدت مختلفة في النُّظُم الثنائية أو الثلاثية الأبعاد التي تتناولها تجربة ليبشابيه. وتطلّب تحليلها مُعادلات رياضية تفاضلية من النوع المُعقّد، وليس مُعادلات الفرق اللوجستي



معلومات العالم الواقعي تؤكّد النظرية: أظهرت رسوم الطيف البيانية التي درسها ليبشابيه، نمط تضاعف الدورات الذي تنبأت به نظرية فايينبوم الشاملة. وظهرت ذرى التردّدات الجديدة مميزة بوضوح عن التشوّش. والحق أن تلك النظرية توقعت مكان ظهور التردّدات الجديدة وشدتها أيضاً.

البسيطة نسبياً. كما ظهر شرخ آخر بين نُظُم الخرائط القليلة الأبعاد، وبين نُظُم تدفق السوائل، التي يُفكر فيها الفيزيائيون باعتبارها تتضمن أبعاداً لا متناهية. إذ تضم خلية صغيرة مثل التي صنعها ليبشابيه، عدداً غير متناهٍ من الجُسيمات. ويمثّل كل جُسيم احتمالاً لحركة مستقلة. وفي بعض الأحيان، يغدو الجُسيم بؤرة لتدويم أو تعرّج. وبحسب قول بيار هونبرغ، المهندس في مختبراتُ «آي تي أند تي بيل» في نيوجرسي الذي أبدى حماسةً لنظرية فايينبوم ولتجربة ليبشابيه: «لم يتوقع أحد من العلماء إمكان وضع خرائط بيانية عن نُظُم فعلية... لقد حلم فايينبوم بها. لكنه لم يدعُ الآخرين إلى النظر اليها كتعبير عن نُظُم فعلية. اشتغل فايينبوم بالخرائط، لكن العلماء لم يهتموا بها. وبدت لهم وكأنها تسلية. لقد بدت تلك الخرائط المتلاعبة وكأنها بعيدة عما يبحث علماء الفيزياء عنه... ولكن تغيّرت الأمور مع تجربة ليبشابيه. فقد أثبتت إمكان فهم سلوك النُّظُم الفعلية بالتفصيل، عبر خرائط لا تحتوي إلاّ على كمية محدودة من احتمالات الحركة».

ويعود الفضل إلى هونبرغ في «الجمع» بين التجربة والنظرية. فقد أدار ورشة عمل في «آسبن» صيف ١٩٧٩، حضرها ليبشابيه. والمفارقة أن فايينبوم استمع، في المكان عينه وقبل ٤ سنوات، لمحاضرة ستيفن سمييل العدد الوحيد الذي يظهر عند مراقبة انتقال مُعادلة مُعيّنة إلى حال الفوضى. وفي ورشة هونبرغ، شرح ليبشابيه تجربته بالتفصيل؛ فدوّنها هونبرغ بعناية. وعندما قفل راجعاً، اتفق أنه مرّ بفايينبوم في «نيومكسيكو»، فأطلعه على ما دوّنه. وسرعان ما اتصل فايينبوم بليبشابيه في باريس التي سافر اليها على جناح السرعة. ووقف الرجلان وسط الفوضى العارمة في مختبر ليبشابيه الباريسي. وبفخر، عرض الأخير علبته الصغيرة على فايينبوم الذي شرح تفاصيل نظريته الشاملة. ثم سارا في شوارع باريس بحثاً عن فنجان قهوة طيّب.

وفي ما بعد، شرح ليبشابيه كيف أنه دُهش من يفاعة مُحدثه وحيويته الفائضة.

أرغمت تلك القفزة من الخرائط إلى تدفق السوائل، حتى أكثر العلماء تحفظاً عن الاهتمام بها وكأنها حلم تحقق أخيراً.

وبدا مُدهشاً أن تعقد الطبيعة صلة بين التعقيد الكبير والخرائط السهلة نسبياً. ووصفها جيري غولوب: «يمكن اعتبارها مُعجزة، وليس مُجرد رابط بين النظرية والتجربة». وخلال سنوات قليلة، تكررت تلك «المُعجزة» في عدد كبير من المختبرات: في خلايا كبيرة ضمّت زئبقاً وماء، في النوابض الإلكترونية المتذبذبة، في الليزر، وحتى في التفاعلاتِ الكيماوية. وتبنّى مُنظّرو الفيزياء والرياضيات تقنيات فايينبوم. واستنبطوا طُرقاً رياضية أُخرى للوصول إلى الكايوس. وابتكروا أساليب مُشابهة لتضاعف الدورات للوصول إلى صورة الفوضى، بما فيها أنماط من التقطّع وأشباه الدورات. واتفقت تلك الأمور أيضاً من نظرية فايينبوم وتجربة ليبشابيه.

ساعدت اكتشافات تلك التجارب على إطلاق حركة إجراء التجارب بواسطة الكومبيوتر. واكتشف علماء الفيزياء أن الكومبيوترات تستطيع أن تُعطي الصور النوعية عينها التي ترتسم في التجارب فعلياً، وبطريقة أسرع وأكثر دقة. وظهرت تجارب أكثر إقناعاً من تجربة ليبشابيه، وخصوصاً تجربة فالتر فرانسيسكاني من جامعة مودينا الإيطالية. وتألّفت من نظام رياضي يعتمد خمس مُعادلات تفاضلية، استطاعت أن تُنتج الجواذب والتضاعف في الدورات. لم يعلم فرانسيسكاني شيئاً عن نظرية فايينبوم، لكن تجربته المُعقّدة والمتعددة الأبعاد أعطت الثوابت نفسها التي ظهرت في خرائط فايينبوم ذات البُعد الواحد. وفي العام ١٩٨٠، استطاعت مجموعة أوروبية أن تنسج برهاناً رياضياً عن العلاقة بين البساطة والتعقيد في ظاهرة الفوضى: التبدّد في الطاقة يستنزف موارد النظام فيُزيل الكثير من الحركات المتعارضة، ما يختزل السلوك المتعدد الأبعاد إلى بعد وحيد.

وخارج إطار الكومبيوتر، ظلّت مسألة العثور على الجاذب الغريب في السوائل تحدياً صعباً. وانشغل بها علماء تجريبيون مثل هاري سويني خلال ثمانينات القرن العشرين. وعندما نجح التجريبيون، بدا إنجازهم قزماً مقارنة بما أنجزه علماء الكومبيوتر. وبدت الصور التي أنتجتها التجارب بدائية حيال الرسوم الرائعة والصور البيانية المُثقلة

بالتفاصيل. وعبر استخدام الكومبيوتر في محاكاة التجارب، يصبح من المستطاع توليد مليارات النقاط التي تحمل كل منها معلومة مُحددة، وبذا تُفصح الأنماط عن نفسها بوضوح.

ففي المختبر، كما في العالم الواقعي، يتمثّل التحدّي الحقيقي في التمييز بين فيض من المعْلومات المفيدة والتشوش. في الكومبيوتر، تسيل المعلومات كالخمرة التي تُسكب من براميل مُعتقة؛ في حين ينبغي القتال للحصول على كل قطرة في المختبرات الفعلية.

وعلى الرغم من ذلك، لم تُقبل نظريات فايينبوم وأضرابه وتشع في المجتمع العلمي، بفضل قوة تجارب الكومبيوتر وحدها. فقد كانت الحاجة إليها واضحة علمياً، من خلال لجوء العلماء المستمر إلى المساومات، إلى التعديل، وإلى تدوير أرقام المعادلات اللاخطيّة التفاضلية. لقد ساعدت المُحاكاة في الكومبيوتر على «تقطيع» الحقيقة إلى أجزاء، لكن ليس الكثير منها. لا يزيد نموذج الكومبيوتر على مجموعة من القوانين الاعتباطية، التي يختارها المبرمجون. ويملك السائل الفعلي، حتى لو جاء في كمية قليلة كتلك التي حصرها ليبشابيه في خليته، إمكانات للحركات الحرّة، لحركات الفوضى التي تبيّن أنها مملوءة بالمفاجآت.

وفي عصر المُحاكاة بالكومبيوتر، ظهر إمكان صنع نماذج عن تدفّق الأشياء كلها، من توربينات الطائرات إلى صمامات القلب بواسطة الكومبيوترات الخارقة. ونسي البعض كم تستطيع الطبيعة أن تُربك حتى أشد العقول مضاءً. والحق أن لا كومبيوتر يستطيع فعلياً أن يحاكي حتى تجربة بسيطة مثل تجربة ليبشابيه، في صورة كُليّة. وعندما يتفحص علماء الفيزياء برامج المُحاكاة، يذهب ذهنه للتفكير في تلك الأشياء التي لم تُلم بها التجربة الإلكترونية، والتي قد تحمل في طيّاتها مفاجآت لا تُحصى. ولطالما ردد ليبشابيه أنه لا يود، السفر في طائرة مُحاكاة إلكترونية، لأن لا حدّ للأشياء التي تفوته حينذاك! وأكثر من ذلك، فقد مال للقول إن المُحاكاة الإلكترونية تُساعد على صنع نوع من الحدس تجاه

الأشياء، أو تحسين بعض الحسابات. لكنها تقصر عن الطبيعي، ولا تفسح مجالاً للاكتشاف. تلك الأمور هي في صلب عمل عالم التجارب.

وفي تجاربه العديدة، بدا ليبشابيه مهجوساً بالدقة، وبدت أهدافه العلمية غامضة دوماً، حتى أن الكثيرين من الفيزيائيين اعتبروه أقرب إلى الفلاسفة أو علماء الرياضيات النظريين.

وفي المقابل، انتقد ليبشابيه دوماً ميل أقرانه إلى الاختزال، كما يظهر في هيمنة فكرة الذرّة على علم الفيزياء. ووصف ذلك بالقول: «يميل عالم الفيزياء راهناً للسؤال عن الذرة وسلوكها، ويطرح أسئلته بناء على تلك الفكرة. ولذا، يحتج إذا قلت إنني لا أهتم بالطريقة التي تتصرف فيها الذرة المُفردة في تجربة معينة؛ وإنني أكثر اهتماماً بالشكل والتطور، وبتفرع الشكل إلى أشكال ثم إلى أشكال. ولهذا، يضع كثيرون علمي كجزء من الرياضيات. ما الذي يمكن أن أقوله حيال ذلك؟ أنا أعمل في مجال الرياضيات، لكنني أعمل في ما له دلالة بالنسبة للعالم الذي نعيشه. ذلك أيضاً جزء من الطبيعة».

لقد عثر ليبشابيه حقاً على أنماط مُجرّدة، أنماط رياضية. لا تصف تلك الأنماط خصائص الهيليوم السائل ولا النحاس الصافي، كما لا تُقدّم معلومات عن سلوك الذرة عندما تقترب من الصفر المُطلق. لكنها الأنماط عينها التي حلم بها العلماء دهوراً.

لقد فتحت تلك الأنماط الباب لنوع من الاختبارات حوّلت كثيراً من العلماء، ومن حقول شتى، إلى مستكشفين يسعون وراء عناصر جديدة في حركة المادة. لقد ظهرت تلك الأنماط للمرة الأولى في تلك التجربة التي رُفعت فيها درجة الحرارة إلى حدّ ظهور تضاعف الدورات ثم تضاعفها ثم تضاعفها. وبحسب نظرية فايينبوم، يُنتج التفرّع أنواعاً من الهندسة بمقاييس دقيقة. إن ما رآه ليبشابيه هو نظرية فايينبوم الشاملة عندما تتحوّل الثوابت في مُعادلاتها من نموذج رياضيّ مثالي إلى وقائع فيزيائية قابلة للانتاج والقياس ولإعادة الانتاج. لقد تذكر طويلاً، بعد ذلك، تلك الرعشة التي تملكته حين رأى التفرّع تلو الآخر، ثم إدراكه أنه يرى مجموعة لا نهائية وغنية في تركيبها وبنيتها.

صُوَر الفوضى

«أي شيء آخر سوى الفوضى التي تمتصّ القوى كلها،
يمكنه صنع ورقة وحيدة»

كونراد أيكن

قابلَ مايكل بارنسلي، عالم رياضيات من جامعة أوكسفورد ميتشل فايينبوم في مؤتمر علمي في جزيرة كورسيكا الفرنسية في العام ١٩٧٩. وناقش المؤتمر النظرية الشاملة وتضاعُف الدورات والمجموعات اللامتناهية للتفرّعات. ووجد بارنسلي في تلك النظرية علماً جديداً، فسعى لكي يخط اسمه في تاريخه.

والتفت إلى ظاهرة تضاعف الدورات وانتقالها من دورتين إلى ٤ إلى ٨ إلى ..١٦... إلخ. وسأل نفسه عن مصدر تلك الأرقام. هل تُمثّل مجرد سحر رياضيّ أم أن لها مصدراً أكثر عمقاً؟ وحدس أنها تأتي من متغيّر غير منظور له طابع تكراري.

وللتعمّق في تلك الفكرة، وضعها في سياق نظرية عددية معروفة تحمل اسم «الأسطح المُركّبة». وفي صلب تلك النظرية، أن الأعداد الحقيقية كلها، السلبية والايجابية، تقع في خط طويل متصل يمتد من اللانهائي السلبي إلى اللانهائي الإيجابي. وبذا، يقع الصفر في منتصف ذلك الخط. وإذا قلنا إن عالم الأعداد يُشبه الكرة الأرضية، فإن ذلك الخط يُشبه خط الإستواء. لكن للكرة الأرضية خطّاً آخر، يمتد بين القطبين الشمالي والجنوبي، ويتقاطع مع خط الإستواء. وفي عالم الأعداد، يُشبه هذا «الخط الآخر» نوعاً آخر من الأعداد يحمل اسم الأعداد الوهمية. وبذا، فإن كل رقم في عالم الأعداد يتألف من قسمين، حقيقي ووهمي. وكذلك يوصف الرقم المؤلّف من هذين القسمين بأنه عدد مُركّب.

وكما أن خرائط الجغرافيا الثنائية الأبعاد (مثل التي تُرسم على الورق) تُحدّد أي موقع على الأرض بمعلومة من قسمين، يعيّن أحدهما موقعه بالنسبة لخط الإستواء والآخر بالنسبة للخط بين القطبين؛ يُحدَّد الرقم المُعقّد بقسمين يعيِّن أحدهما قيمته بالنسبة لخط

الأعداد الحقيقية، والآخر بالنسبة لخط الأعداد الوهمية. واستطراداً، فإن الأرقام المُركّبة التي يساوي قسمها الوهمي صفراً، تقع كلها في خط الأعداد الحقيقية. والعكس صحيح أيضاً، بمعنى أن الأعداد المُركّبة التي يساوي قسمها الحقيقي صفراً، تقع كلها في خط الأعداد الوهمية.

وبالاستناد إلى نظرية الأسطح المُركّبة، يمثّل التفكير في الأعداد الحقيقية وحدها نظرة جزئية، لأنها تُغفل الشقّ الآخر الوهمي من العدد. وفكّر بارنسلي في نظرية فايينبوم انطلاقاً من هذه النظرة. وللإيضاح، فإن استعمال تسميتي «حقيقي» و«وهمي» في الأعداد يرجع إلى شيء من الماضي، حين نُظر إلى الأعداد العادية باعتبارها أقرب إلى الأعداد الحقيقية التي صارت، بالتالي، أكثر أهمية. أما راهناً، فيُنظر إلى نوعيّ الأعداد كأشياء متساوية الأهمية.

ولم يعد للتسمية الدلالة التي كانتها سابقاً، بل أصبح هذا التصنيف شبه اعتباطي. وبالتعريف، فإن الأعداد الوهمية هي تلك التي تُعبّر عن الجذر التربيعي للأعداد السلبية، والتي لا تُعطي الأعداد «الحقيقية» جواباً عنها. وبعد ذلك، أدرك علماء الرياضيات أهمية الأعداد الوهمية بحيث باتت الشقّ المُكمّل للأعداد الحقيقية.

وأتاح اعتماد شقين في وصف العدد ابتكار نوع جديد من المُعادلات عرف باسم «المُعادلات الإسمية المُتعددة». وراهناً، تتعامل الرياضيات مع الأرقام المُركبّة، مثل تعاملها مع الأعداد الحقيقية. وكذلك يمكن استعمالها في أنواع الحسابات كلها. وهكذا، عمد مايكل بارنسلي إلى تحويل أرقام فايينبوم العادية، إلى أرقام مُركّبة، ثم رسمها بموجب نظرية «الأسطُح المُركّبة». ولاحظ أنها تُعطي مجموعات من الأشكال، التي تُذَكّر بالنُّظُم الديناميكية، كما تشيد بنية رياضية مُدهشة.

واتضح له أيضاً أن الدورات التي رصدها فايينبوم لم تأت من فراغ؛ بل تقع في خط الأعداد الحقيقية حيث تتوافر مجموعات من الدورات، ومن كل أنواع الانتظام.

فإضافة إلى الدورات الثنائية التي أثبتها فايينبوم، تبدّت لعينَي بارنسلي أنواع أخرى

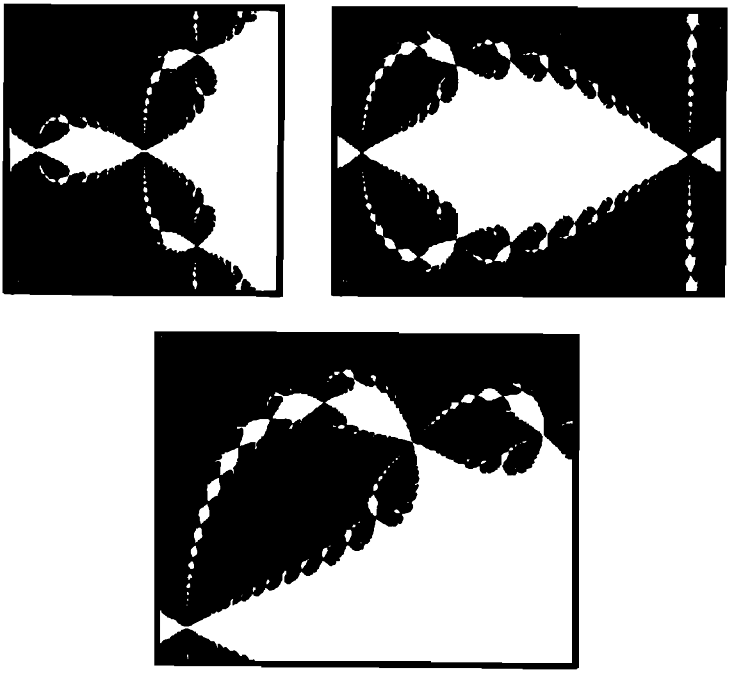
من الدورات (ثنائية، ثلاثية ورباعية)، كانت «مختبئة» في النظام الذي عمل عليه فايينبوم. ولا تظهر تلك الدورات إلا إذا رُسِمت الأرقام على خطوط الأعداد في الأسطح المُركبة. وقفل بارنسلي عائداً من مؤتمر كورسيكا إلى مكتبه في «معهد جورجيا للتقنية»، ليكتب ورقة بحث عن تلك الملاحظات. وأرسلها إلى مجلة «الاتصالات في الفيزياء الرياضية». وصودفَ أن مدير تحريرها هو ديفيد رييال، الذي أدرك فوراً أن ما فعله بارنسلي يمثّل تكراراً لعمل غير مشهور أنجزه عالم رياضيات فرنسي قبل نصف قرن! ولاحقاً، كشف بارنسلي أن رييال رد الورقة بسرعة، مع جملة في أعلاها تقول: «مايكل... أنت تتحدث عن مجموعات جوليا... اتّصِل بماندلبروت».

قبل ذلك بثلاث سنوات، درَّس جون هوبارد، وهو عالم رياضيات أميركي مفتون بلبس القمصان المزركشة، مادة التفاضل والتكامل الأساسي في جامعة «أوراسي» الفرنسية.

ومن بين المواضيع الرئيسية التي علَّمها في تلك الجامعة، طريقة نيوتن في العمل على المُعادلات الفيزيائية، عبر إجراء سلسلة من التقريبات، التي تجعل النتائج أكثر وضوحاً. وذات مرة، قرر هوبارد أن يُغيّر الطريقة الرتيبة التي اعتاد أن يشرح بها منهجية نيوتن، وذلك لإرغام طلابه على التفكير المُعمّق فيها.

تُمثّل طريقة نيوتن أسلوباً قديماً، بل إنها كانت قديمة عندما اكتشفها نيوتن! فقد استعمل قدماء الإغريق أسلوباً مماثلاً عند احتساب الجذر التربيعي للأرقام.

تعتمد طريقة نيوتن على البدء بتخمين مُعين وإجراء الحساب للتوصل إلى تخمين آخر أكثر دقة، ثم معاودة عملية الحساب مُجدداً للوصول إلى تخمين أفضل وهكذا. وتُشبه تلك العمليات المتلاحقة نظاماً ديناميكياً في الفترة التي يسعى فيها للوصول إلى حال مستقرة. وتبدو الطريقة سريعة، إذ يتضاعف ظهور الأرقام العشرية الصحيحة مع كل دورة من الحلّ. وراهناً، تحتسب الجذور التربيعية بطرق أكثر دقة. وينطبق الأمر على المُعادلات الإسمية من الدرجة الثانية، التي تُضرب فيها المتغيّرات بنفسها، أي أنها تُرفع



حدود التعقيد اللامتناهي: عندما تقسم شطيرة إلى ثلاثة أقسام، فإنها تتلاقى في نقطة مُعيّنة، كما تكون الحدود بين الشطائر واضحة. لكن كثيراً من عمليات الحساب في الرياضيات المُجرّدة، وكذلك في فيزياء النُظُم الواقعية، تظهر أن قسمة بحدود مُعقّدة على نحو يفوق الخيال. في الأعلى، صورة عن تطبيق طريقة نيوتن لاحتساب الجذر التكعيبي للعدد واحد سلبياً على سطح الأعداد المُركّبة، مما يقسم السطح ٣ شطائر متماثلة، تظهر إحداها بالأبيض. تبدو النقاط البيض كلها «منجذبة» إلى الجواب الذي يقع في منتصف المنطقة البيضاء؛ وتنجذب النقاط السود إلى واحد من الحلّين الباقيين. وتملك الحدود صفة غريبة وهي أن النقاط فيها تنتمي إلى الحلول الثلاثة في آن واحد. وكما يظهر في بقية الصور، فإن تكبير تلك القطع يُظهر تراكيب تكرارية مُتغيّرة (فراكتال) يتكرر النمط الأصلي فيها دوماً ولكن على مقاييس متبدّلة باستمرار.

إلى قوة ٢. وتصلح طريقة نيوتن في حلّ مُعادلات إسمية من درجات أعلى، والتي لا تُحلّ بطريقة مباشرة.

وتُناسب تلك الطريقة حسابات الكومبيوتر الذي تُعتبر قدرته على تكرار العمليات الحسابية، من مكامن قوته الأساسية. ثمة إزعاج في طريقة نيوتن يأتي من احتمال التوصّل إلى أكثر من حلّ للمسألة عينها، خصوصاً عندما تُستعمل كأداة لحلول مُعقّدة. فعند تغيير التخمين الأول، تتبدل النتيجة النهائية. ولا يُقلّل هذا الأمر من القيمة العملانية لتلك

الطريقة. إذ كثيراً ما يمتلك الذي يتصدى لحل مسألة ما، فكرة عن النتيجة التي قد يصل إليها. وإذا لم يتحقق تخمينه، ففي إمكانه البدء من رقم آخر.

وقد يسأل بعضهم عن الطريق الذي تسير فيه منهجية نيوتن خلال احتساب الجذر التربيعي لمعادلة إسمية من الدرجة الثانية على سطح مُركّب. وقد يأتي الجواب، بالنسبة لمن يفكّر في الحل بطريقة هندسية، بأن طريقة نيوتن تحاول أن تتقرى أيّاً من الجذرين التربيعيين أقرب إلى التخمين الأول. وكان ذلك ما أخبر به هوبارد طُلابه، ثم أضاف: «أما بالنسبة إلى المُعادلات من الدرجة الثالثة، أو أكثر، فسأحاول أن أفكر في أمرها، ثم أُخبركم عن الجواب في الأسبوع المقبل». وحينذاك، لم يدر في خلده سوى إن العمل الأكثر مشقة في تلك الطريقة يتمثّل في تدريس طُلابه كيفية تكرار الحسابات، مُعتبراً أن مسألة التخمين الأول سهلة.

وعلى نحو لم يكن متوقعاً، أمضى هوبارد وقتاً صعباً. فكلما أمعن في التفكير، توضّح لديه أكثر ضآلة ما يعرفه عن مسألة التخمين الأول، بل حتى عن مجمل ما تؤديه طريقة نيوتن في مسألة التقريب. ولاح له أن الحلّ الهندسي الأسهل يتمثل في تقسيم مسطح الأعداد المُركّبة إلى ثلاثة أقسام يشبه كل منها الشطيرة. ثم وضع جذراً تربيعياً في قلب كل شطيرة. وسرعان ما اكتشف فشل تلك الطريقة، خصوصاً أن الأرقام تصبح غرائبية عند الحدود التي تُحدّد الشطائر. واكتشف هوبارد أيضاً أنه لم يكن الأول في ملاحظة تلك الصعوبة. ففي العام ١٨٧٩، حاول اللورد أرثر كارلايل الانتقال من حلّ مُعادلات الدرجة الثانية إلى الثالثة، باستخدام طريقة نيوتن، فواجه الصعوبة عينها التي لاقاها هوبارد بعده بقرن! والحق أن الفرق بينهما تجسد في أداة جديدة امتلكها هذا الأخير، ولم تتوافر أيام كارلايل. وكعالم رياضيات، عُرف هوبارد بدقته الصارمة وبازدرائه للتخمين والتقريب والحلول المبنية على الحدس أكثر من البرهان.

وفي مؤشر لافت عن ميله للدقة الصارمة، أصرّ هوبارد طوال عقدين على القول إن لا أحد يستطيع الحسم بشأن دقة المُعادلات التي تُستخدم في صنع جاذب لورنز، الذي يمثّل

بداهة غير مُثبتة. ونظر إلى اللولب المزدوج، الذي يُظهره الجاذب عبر ظاهرة تضاعف الدورات، كنوع من الدليل الذي لا يرقى إلى مرتبة البُرهان، وإنه مجرد دليل يرسمه الكومبيوتر. ومع تعثّره في اكتناه الدلالة العميقة لنظرية نيوتن، شرع هوبارد في استخدام الكومبيوتر، على رغم تحفّظه عن تلك الآلة. ولا يستطيع الكومبيوتر أن يُثبت شيئاً، لكنه يُساهم فيُ «تظهير» المشكلة التي يحاول عالم الرياضيات حلها. وشرع هوبارد في إجراء تجارب على الكومبيوتر، محوِّلاً طريقة نيوتن من أداة في حل المسائل إلى مسألة بحد ذاتها! وابتدأ من مُعادلة إسمية ثلاثية بسيطة. ورسمها على سطح الأعداد المُركّبة. فظهر له الحل على شكل مثلث متساوي الأضلاع، تُشير زواياه إلى مواقع الساعات الثالثة والسابعة والحادية عشرة. ويعني ذلك أن لتلك المُعادلة ثلاثة حلول ممكنة. ثم حاول حلّ تلك المُعادلة عينها باستخدام طريقة نيوتن في التقريب، لكي يرى أياً من تلك الحلول ستصله تلك الطريقة.

وبذا، صار الوضع وكأن طريقة نيوتن هي نظام ديناميكي تُمثّل الحلول الثلاثة جواذبه الغريبة. وفي تشبيه آخر، بدا سطح الأعداد المُركّبة وكأنه جبل جليد أملس ينزلق عليه الحل متجهاً صوب واحدة من ثلاث قرى في الوادي، فإلى أي منها سيصل؟

وتقضي طريقة نيوتن أن يُبتدأ الحل بتخمين عدد معيّن، أي البدء من نقطة ما على سطح الأعداد. والحق أنه يمكن البدء من أي نقطة بصورة حدسية، مما يعني وجود عدد لا نهائي من النقاط التي يمكن البدء منها للتوصل إلى الحل. وبصبر، استعمل هوبارد الكومبيوتر لكي ينتقل من نقطة إلى أُخرى. وفي كل مرة يصل إلى أحد الحلول الثلاثة، يلوّن نقطة البدء بلون يشير إلى ذلك الحل، هذه النقطة التي رمز إليها بالأزرق والأحمر والأخضر. وبصورة تقريبية فجّة، قسّمت تلك النقاط سطح الأعداد المُركّبة إلى ثلاث شطائر. وبصورة عامة، فإن النقاط القريبة من إحدى زوايا المثلّث أوصلت إلى الحل الذي تُمثّله تلك الزاوية بسرعة. وفي المقابل، فإن التدقيق في تفاصيل تلك الأمور، ودوماً باستعمال الكومبيوتر، أوصل هوبارد إلى

ملاحظات مختلفة. فقد تبيّن له وجود نوع من التنظيم المُعقّد «مختبئ» خلف تلك الصورة التقريبية السهلة.

وكذلك لاحظ أن بعض الحلول تسير بصورة مثيرة. فبعد الانطلاق من تخمين جيّد، لا توصل طريقة نيوتن إلى الحل بسرعة، بل تبدو الأرقام وكأنها تتقافز بطريقة اعتباطية ظاهرياً، قبل أن تصل إلى الحل. وفي بعض الأحيان الأُخرى، تبدو بعض أرقام البداية، وكأنها تسير في دورات تُكرّر نفسها دورياً، وبصورة مستمرة، فلا تصل البتة إلى أيٍ من الحلول.

وبمزيد من التعمق في صور الكومبيوتر، لاحظ هوبارد وتلامذته ظاهرة مُذهلة. فقد توقعوا أن تمتد خطوط واضحة من نقاط الانطلاق (التخمين الأول) بين زوايا المثلّث (التي تُمثّل الحلول الثلاثة)، التي لوّنت بالأخضر والأحمر والأزرق. وبدل أن تمتد مجموعة من نقاط حمر وزرق بين الزاويتين الزرقاء والحمراء، مثلاً، ظهرت بقع كبيرة من اللون الأخضر، وهو لون الزاوية الثالثة! وبكلام آخر، فإن النقاط الممتدة بين حلّين، انتمت إلى حل ثالث. وفي سياق مشابه، لم تظهر الحدود بين الشطائر الملوّنة الثلاث بشكل واضح أيضاً. وبالتدقيق، ظهر أن خط الحدود الخضر والزرق بين الشطيرتين مثلاً، مملوء بالبقع الحمر!

وفي النهاية، أدرك هوبارد أن ليس ثمة نقاط تفصل بين حدود لونين. فعندما يقترب لونان أحدهما من الآخر، يفرض الحل الثالث نفسه بينهما، عبر تدخّلات جديدة ومتكرّرة. إذاً، فكل نقطة حل تحاذي منطقة للحلول الثلاثة معاً! لم تكن تلك الأمور مألوفة في علم الرياضيات، بل إنها مثّلت حالاً مستحيلةً.

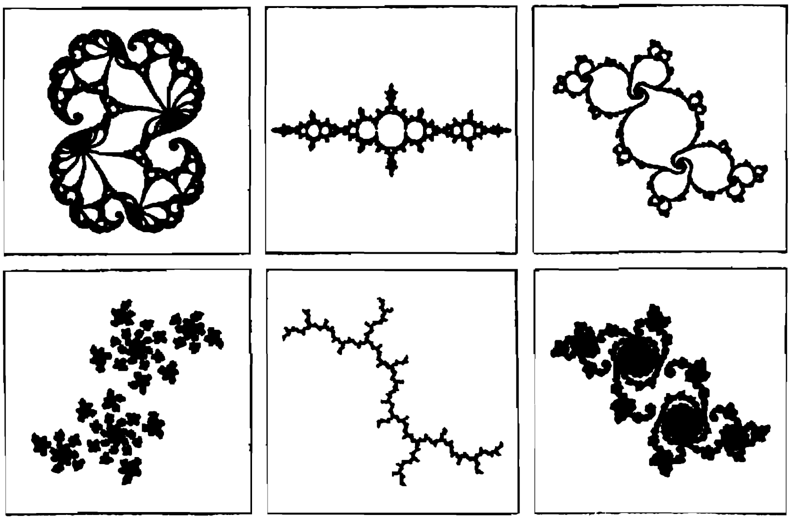
وانكب هوبارد على درس تلك الأشكال المتداخلة بتركيبها الفائق التعقيد، من أجل التوصل لفهم إملاءاتها بالنسبة إلى علم الرياضيات. وسرعان ما تحوّل عمله إلى اكتشاف لأسلوب جديد في حل المُعضلات الرياضية المتصلة بالنُّظُم الديناميكية.

وبذا، أدرك هوبارد أن تحويل طريقة نيوتن إلى خرائط أوصل إلى عائلة من الرسوم البيانية التي تُعبر عن سلوك القوى الموجودة في العالم واقعياً. ولقد توصل مايكل بارنسلي إلى عائلة أُخرى. وأما بنواه ماندلبروت، كما سيعلم هوبارد وبارنسلي سريعاً، فقد عكف على وضع الجد الأكبر لتلك العائلات كلها.

يصف المعجبون مجموعة ماندلبروت بأنها أكثر الأشياء تعقيداً في عالم الرياضيات. ويلزم وقت أطول من الزمن نفسه لرؤيتها كاملة، إذ تكتظ أقراصها بالأشواك المُسنّنة، وتلتف خطوطها اللولبية وتشعباتها الدقيقة إلى الخارج وعلى نفسها، فتصنع جزيئيات ضخمة في ثناياها، وتتغير باستمرار وكأنها مُعجزة مُتجددة. وعند رؤيتها صورتها مُلوّنة على شاشة كومبيوتر، تصنع مجموعة ماندلبروت هندسة من التكرار المتغيّر، أكثر من هندسة الفراكتال نفسها. لا تكفّ عن التكرار والتغيير، ولا تتوقّف عنهما، كأنما بلا نهاية. ولوصف نماذج من حدودها، يلزم كمية لا نهائية من المعلومات. وعلى الرغم من ذلك، تنطوي مجموعة ماندلبروت على مُفارقة مدوّية.

إذ تكفي بضعة أسطر من الشيفرة المكتوبة بالأرقام لكي تصف المجموعة كاملة! وبذا، يستطيع حتى أكثر الكومبيوترات تواضعاً أن يُعيد إنتاج المجموعة بأكملها! ولم يكن الأشخاص الأوائل، ممن أدركوا المدى الهائل لهذا التناقض بين التعقيد اللامتناهي والبساطة التامة لتلك المجموعة، على استعداد لتقبّله، بمن فيهم ماندلبروت نفسه. وبسرعة، صارت «مجموعة ماندلبروت» رمزاً لنظرية الكايوس. وظهرت صورها على أغلفة الكتيبات والمجلات والفصليات الهندسية. وشكّلت البؤرة الأساسية للفن الرقمي. وبين عامي ١٩٨٥ و١٩٨٦، تنقل بها حول العالم معرضٌ عن فن الكومبيوتر. يسهل التأثر بالقوة الجمالية لتلك الصور، لكن يصعب فهم إملاءاتها بالنسبة إلى علم الرياضيات، الذي امتصها ببطء أيضاً.

يمكن صنع الكثير من الأشكال الفراكتالية، باللجوء إلى عمليات متكررة عبر سطح الأعداد المُركّبة، لكن ليس ثمة سوى مجموعة ماندلبروت وحيدة. ظهرت للمرة الأولى،



توليفة من «مجموعات جوليا».

وفي شكل غائم وطيفي، عندما حاول ماندلبروت إيجاد طريقة لاستخراج نمط عام من «مجموعات جوليا».

ابتكر عالما الرياضيات الفرنسيان غاستون جوليا وبيار فاتو، في الحرب العالمية الأولى، تلك المجموعات. وقد درساها بكد، خصوصاً أن ذلك حدث قبل ابتكار الكومبيوتر. لقد رأى ماندلبروت عملهما، وضمنه رسومهما الغائمة، عندما كان في العشرين من العمر. وكذلك ملأت تلك المجموعات عينها خيال بارنسلي أيضاً. وتُشبه بعض «مجموعات جوليا» الدوائر التي ضُغطت وضُربت وحُوّرت في أكثر من مكان، مما أعطاها شكلاً من التكرار المُتغيّر. وبعضها متشظٍ إلى قطع كثيرة في حين يشبه بعضها الآخر الغبار المتناثر. ولا تستطيع الكلمات، ولا مفاهيم الهندسة الإقليدية، وصفها.

وتحدث عنها عالم الرياضيات الفرنسي آدريان دوادي فقال: «يمكن الحصول على توليفات لا تُصدق كثرتها من «مجموعات جوليا»... بعضها يشبه الغيوم الكثيفة، وبعضها فرشاة التنظيف البالية؛ وتبدو ثالثة كتلك النُّثر النارية التي تلتمع في السماء بعد انفجار الأسهم النارية. يُذكر قسم منها بالأرنب، والآخر بذيل الحصان».

في العام ١٩٧٩، اكتشف ماندلبروت أن باستطاعته صنع رسم منفرد، على سطح الأعداد المُركبة، يصلح كنموذج لمجموعات جوليا، بحيث يعمل كدليل لصنع رسومها كلها. وتوصّل إلى ذلك النموذج من خلال عمله على الطُّرق التكرارية المستخدمة في العمليات الرياضية المُعقّدة، مثل تلك التي تتضمنها حلول المعادلات المُكوَّنة من جذور تربيعية ومُماس الدائرة وجيب الزاوية وغيرها. وشكّل الأمر «صدمة» لماندلبروت،على رغم أنه بنى مساره المهني حول مفهوم البساطة التي تولّد التعقيد، إلا أن إيجاد مُعادلة وحيدة لصنع «مجموعات جوليا» المُعقّدة؛ شكّل أمراً فاق توقعاته. ولم يستطع استيعاب الشكل الذي أخذ بالتحويم فوق شاشة كومبيوتر مكتبه في جامعة هارفارد. وضغط على مُبرمجي الكومبيوتر في شركة «أي بي أم» لكي يصنعوا برامج أكثر تفصيلاً.

واصطدم هؤلاء بمجموعة من الإشكالات المتعلقة بأمور تقنية محضة مثل سعة الذاكرة العملانية في الكومبيوتر، خصوصاً بالنسبة إلى العلاقة بين الكومبيوترات الأساسية وشاشات عرض الرسوم البيانية. وزاد في الطين بلة، حذر المبرمجين الدائم من ظهور «أخطاء فنية» على الشاشات، لأنها تظهر كنوع من النقاط العشوائية المُتكرّرة، والتي لا دلالة لها سوى التشوّش في الآلة نفسها، بل يختفي الكثير من تلك النقاط عند إعادة صوغ برامج الكومبيوتر.

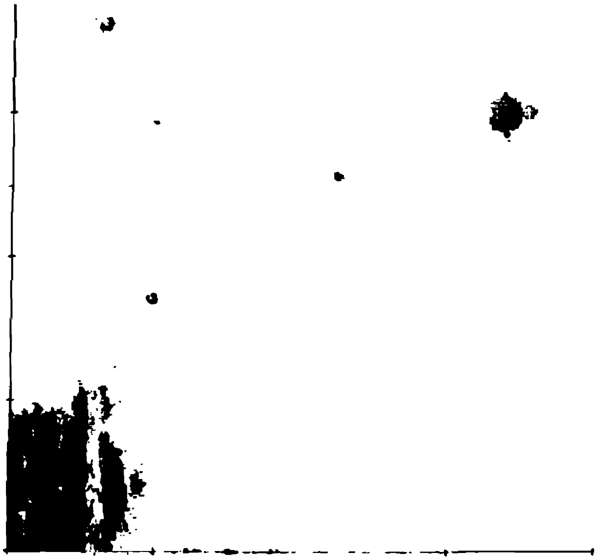
وعندئذ، أدار ماندلبروت انتباهه إلى برنامج بسيط يستطيع إعطاء بعض الرسوم السهلة. وجعل ذلك البرنامج يعيد تغذية نفسه مرّات عدّة، بطريقة مؤتمتة ذاتياً. وسرعان ما ظهرت ملامح ضبابية تُشبه الأقراص. وباستخدام الورقة والقلم، تبيّن لماندلبروت أن الأقراص تُمثّل حلولاً رياضية فعلياً، وليست مجرد مفارقات حسابية نافرة. فإلى يمين الأقراص الأساسية ويسارها، ظهرت ملامح غائمة أيضاً لأشكال أُخرى. وقرأ دماغ ماندلبروت، بحسب ما صرح به لاحقاً، تلك الأمور على نحو مختلف.

إذ رأى فيها نوعاً من الهرمية تنظيمياً لتلك الأشكال، بحيث يولّد كل شكل آخر أصغر

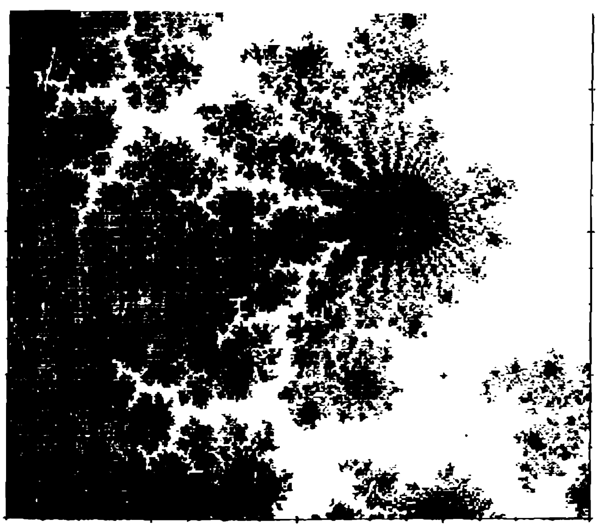
منه، وهكذا. وعند تقاطع تلك الرسوم مع خط الأعداد الحقيقية، يَتّبع توالد الأشكال هندسة تكرارية منتظمة تُذكّر بما اكتشفه فايينبوم عن التفرّعات المُعبّرة عن عمل النُّظُم الديناميكية.

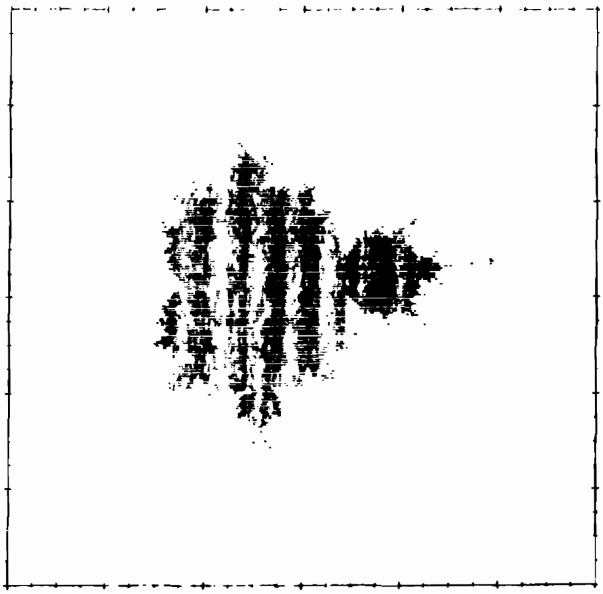
وشجّع هذا الاكتشاف ماندلبروت على تطوير حساباته باستخدام الكومبيوتر، بحيث يُصفي تلك الأشكال الغائمة التي ظهرت عند بداية التجربة. وسرعان ما لاحظ وجود نوع من تراكم «الأوساخ» عند حواف الأقراص، وأيضاً في المساحات القريبة منها. وغاص في تفاصيل حساباتها، ليكتشف أنه بدأ يضيع في غابة من الحسابات المرتبكة. وبدلاً من التحسّن، صارت تلك الصور أشد ضبابية. وهرع إلى شركة «أي بي أم» ليستعمل كومبيوتراتها القوية التي تفوق قدرات نظيراتها في جامعة هارفارد. وأعطته تلك الكومبيوترات الإشارة التي طال انتظارها. وتبيّن أن تلك «الأوساخ» تُعادل شيئاً واقعياً. إذ تعمل تلك البراعم والخيوط اللولبية الرفيعة على إبعاد الوهن والضعف عن الأقراص الأساسية. وبقول آخر، فإنها تُساعد الأشكال الرئيسية على تجديد نفسها، لكي تكتسب من نفسها قوة تتجدَّد باستمرار. لقد غذى اللاعقلانيُّ العقلانيَّ في التكرار المُتغيّر ورسومه.

رسم ماندلبروت مجموعة من النقاط، بحيث صارت كل نقطة على السطح المُركّب (لنتذكر أن النقطة توازي عدداً مُركّباً)، إما داخل تلك المجموعة وإمّا خارجها. ولتحديد سمة تلك المجموعة، أخذ ماندلبروت يختبر كل نقطة عددياً. وعند اختبار نقطة على السطّح المُركَّب، يؤخذ الرقم المُركّب الذي تُشير إليه، ثم يُضرب بنفسه، ثم تُجمع النتيجة مع الرقم كما كان قبل الضرب، ثم يُضرب الحاصل بنفسه، ثم تُجمع النتيجة مع الرقم كما كان قبل الضرب وهكذا دواليك. إذا اتجه الحاصل إلى اللانهائي، فإن تلك النقطة لا تنتمي إلى مجموعة ماندلبروت. أمّا إذا بقي الحاصل محدوداً (ويعني ذلك أنه أسير تكرار لولبي أو أنه يهيم ويرتد عشوائياً)، فإن تلك النقطة تنتمي إلى مجموعة ماندلبروت.



ظهور مجموعة ماندلبروت: في النتائج الأولى الخام لتجربة بنواه ماندلبروت على الكومبيوتر، ظهر شكل مُشوش. ومع تحسّن الحسابات على الكومبيوتر، تحسّن ذلك الشكل تدريجاً، فصارت ملامحه أشد وضوحاً. ولم يكن مُمكناً، حينذاك، تحديد إذا ما كانت تلك «الجسيمات المُعلقة» تمثّل أوساخاً أو عناصر متصلة بالشكل الرئيسي.







إن العمل الذي يتضمن تكرار عملية ما بطريقة لا نهائية، ثم سؤال هل كانت النتيجة لا نهائية أم محدودة يُشبه (أي العمل) عملية التغذية الراجعة في الواقع المُعاش.

تخيّل أنك تُركّب ميكروفوناً ومُكبّراً للصوت وسمّاعات في قاعة للحفلات الموسيقية. تهتم كثيراً لآثار التغذية الراجعة. فإذا جاء صدى الصوت شديد القوة فإنها تدخل الميكروفون ثم يُضخّمها المُكبّر، فتعطي صوتاً أكبر وأكبر إلى ما لا نهاية، أي التغذية الراجعة مُتجهة إلى اللانهائي.

ويحدث العكس تماماً إذا كان الصوت شديد الوهن، فيذوي سريعاً. وإذا نقلنا تلك التجربة عن التغذية الراجعة إلى عالم الأرقام، يمكن البدء برقم ثم ضربه بنفسه ثم ضرب الحاصل بنفسه وهكذا. وتصل سريعاً إلى استنتاج أن الأرقام الكبيرة تسير بسرعة نحو اللانهائي، أما الكسور، فإنها تتضاءل تدريجاً. ولصنع صورة هندسية من تلك التجربة، تُحدّد مجموعة من النقاط بحيث لا تسير مسرعة نحو اللانهائية، عندما تُدخل تكراراً إلى المُعادلة. لنفترض أن تلك الأرقام تسير على خط من صفر إلى أعلى. عندما تُعطي نقطة مُعينة سلسلة من الأرقام (عبر سلسلة من عمليات التغذية الراجعة) بحيث تسير إلى اللانهاية، يمكن تلوينها بالأبيض. وفي حال العكس، تُلوّن بالأسود. وسرعان ما يتشكل خط أسود بين رقمي صفر وواحد. وبالنسبة إلى عملية تجري في مسطح له بُعد واحد، يمكن القول بسهولة إن الأعداد التي تزيد على واحد، تصل إلى اللانهاية بسرعة. أما بالنسبة للسطح المُركّب الثنائي الأبعاد، فإن معرفة الشكل العام للمُعادلة لا يكفي لمعرفة الشكل الذي سيتولّد من تكرار المُعادلة ذاتياً. فعلى عكس الأشكال التقليدية في الهندسة، مثل الدائرة والمدار الإهليليجي والقطع المكافئ، لا تتيح مجموعة ماندلبروت فرصة للتوقّع السهل. ولا مفر من العمل تجريبياً، عبر الخطأ والصواب، للتوصل إلى الشكل الذي تسير فيه المُعادلة. إن العمل عبر الخطأ والصواب جعل رواد هذا المجال أقرب إلى روح المستكشفين (مثل ماجلان أو كريستوفر كولومبوس) منهم إلى هندسة إقليدس.

إن هذه الطريقة الجديدة من عقد الصلة بين عالميّ الأرقام والأشكال، شكّل قطيعة مع الماضي علمياً. وبحسب التجربة التاريخية المتراكمة، يولد علم هندسة جديد في كل مرّة يجرى فيها تحدي قانون أساسي سائد. مثلاً، يخرج عالم هندسة ليفترض أن الفضاء مقوّس وليس مُسطحاً، فتكون النتيجة انكشاف قصور الهندسة الإقليدية وظهور النظرية العامة في النسبية. يخرج آخر ليفترض أن الفضاء فيه خمسة أبعاد أو ستة، وبذا، فإن الرقم المُعبر عن موقع الأشياء في الفضاء يتألف دوماً من الكسور. لنفترض أنه يمكن ليّ الأشياء ومطّها وثنيها وجعلها في عقدة. لنفترض الآن، أن الأشكال مُحدّدة، لكن ليس عبر حل مُعادلة رياضية مرة وحيدة، بل عبر تكرار تلك العملية مع تغذية راجعة ذاتياً.

لقد بدّل علماء الرياضيات، مثل جوليا وفاتو وهوبارد وبارنسلي وماندلبروت القوانين لكي يصنعوا أشكالاً هندسية. وعملت هندستا إقليدس وديكارت بموجب أساليب ترتكز على تحويل المُعادلة إلى خطوط ومنحنيات يعرفها جيداً طلاب المرحلة الثانوية، ويستعملها كل من يحاول تحديد موقع في خريطة مرسومة على الورق، أي باستعمال رقمين. لقد اعتمدت الهندسة قروناً طويلة على تفكير مفاده الانطلاق من مُعادلة مُعينة، ثم البحث عن الأرقام التي تلائمها.

ثمة مُعادلة معروفة، من الدرجة الثانية، لرسم الدائرة بيانياً. وثمة مُعادلات أبسط لصنع أشكال أبسط، مثل المنحنى البيضاوي والقطع المُكافئ والقطع الناقص. كما تُعطي معادلات التفاضل والتكامل أشكالاً أكثر تعقيداً في «فضاء الحال». ولكن، عندما يُكرّر عالم الهندسة مُعادلة مُعينة، بدل محاولة حلّها، تخرج تلك المُعادلة من كونها وصفاً لشكل وتصبح عملية قائمة في ذاتها.

وتُضحي نظاماً ديناميكياً وليس شيئاً ساكناً. عندما يُدخل رقم ما إلى تلك المُعادلة، فإن الناتج يكون رقماً يدخل في المُعادلة مُجدّداً وهكذا. وعندئذ تتقافز النقاط المُعبّرة عن تلك الأعداد، من مكان إلى آخر. ولا تعود عملية وضع نقطة على رسم بياني، لتعني التعبير عن مُعادلة مُعينة، بل تُصبح وصفاً لنوع من السلوك. يمكن ذلك السلوك أن يكون حالةً

ساكنة. ويقدر سلوك آخر أن يكون تلاقياً لحالات من التكرار الدوري. ويستطيع سلوك ثالث أن يخرج عن السيطرة ليدخل إلى السباق نحو اللانهاية.

قبل الكومبيوتر، لم يستطع العلماء التوصّل لهذه الأشياء حتى عندما فكروا فيها، مثل فاتو وجوليا، لأنهم افتقدوا الوسيلة اللازمة لصنع تلك الأشكال الجديدة. لقد أعوزتهم الأداة التي تُمكّن من تحويل أفكارهم علماً. ومع الكومبيوتر، صارت الهندسة المبنية على الخطأ والصواب مُمكنة. لقد استكشف هوبارد طريقة نيوتن من خلال حساب سلوك النقطة تلو الأُخرى. وصار ماندلبروت أول من شاهد المجموعة التي حملت اسمه، لأنه استخدم كومبيوتراً قادراً على ملاحقة النقاط في سطح الأعداد المُركبة، النقطة تلو الأُخرى أيضاً.

ربما ليس كل نقطة. فالحق أن الوقت وقدرات الكومبيوتر محدودان، لكن النقاط لا متناهية. لذا، تمّ اللجوء إلى حساب الأعداد المُجمّعة. وكلما كانت المجموعة أكثر تقارباً، أعطت أشكالاً أكثر وضوحاً، لكنها تستلزم وقتاً أطول أيضاً. وبالنسبة إلى مجموعة ماندلبروت، بدا الحساب سهلاً، لأن العملية التي تُكرّر نفسها سهلة، أي ضرب رقم ما بنفسه، ثم جمعه مع نتيجة الضرب للوصول إلى رقم ثانٍ تُكرّر عليه العملية نفسها مُجدّداً.

واستفاد هوبارد من استعمال الكومبيوتر كوسيلة في تجارب الرياضيات لتقصّي الأشكال. واستطاع إضافة مُساهمة أصيلة بتطبيقه طُرُق التحليل المُعقّد، وهو ما لم تجرؤ الرياضيات على فعله سابقاً بالنسبة للنُّظُم الديناميكية. وشعر بأن الأمور يوضح بعضها البعض، وأن مناهج متفرقة في علم الرياضيات أخذت في التلاقي والتقاطع. وأحسّ بأن رؤية مجموعة ماندلبروت لا يكفيه. وأراد أن يفهمها، وذاك أمر زعمه لاحقاً.

ولو أن الحدود التي توصل هوبارد إليها، بين الشطائر الثلاث على سطح الأعداد المُركّبة، كانت من النوع الفراكتال، بالمعنى الذي أشاعته تلك الرسوم المتوحشة التي توصّل إليها ماندلبروت، لتعيّن أن تُشبه كل صورة سابقتها كثيراً.

إذ يُتيح مبدأ التشابه مع الذات عبر المقاييس المختلفة التنبؤ بما سيراه الميكروسكوب

الإلكتروني عند المستوى التالي من تكبير الصورة. ولا تسير الأمور على هذا النحو بالنسبة للوحوش التي ترسمها هندسة التكرار المُتغيّر (فراكتال) بالاستناد إلى مجموعة ماندلبروت. فعند المستوى التالي من «التكبير» في تلك المجموعة، أي عندما تدور عملية الحسابات كرّة أُخرى، تُظهر تلك الوحوش المزيد من المفاجآت غير المتوقعة. ولذا، بات ماندلبروت قلقاً من أنه ربما أعطى تعريفاً ضيّقاً للفراكتال، لكنه أراد أن ينطبق ذلك المُصطلح على وحوشه. لقد أثبتت مجموعته أنها تحتوي، إذا نُظر إليها بتكبير مناسب، على نسخ تقريبية من نفسها مع جزيئيات تشبه الحشرات الصغيرة «تطفو» عبر الجسم الرئيسي وتتقافز هنا وهناك. وبالمزيد من التكبير، تبيّن أن تلك الأشياء الصغيرة غير متشابهة. فقد ظهرت دوماً أشكال جديدة مثل أحصنة البحر وأُخرى مثل النباتات الاستوائية وسواهما.

والحق أن ما من قسم من مجموعة ماندلبروت يُشبه القسم الآخر، وعبر المقاييس كلها.

أدى اكتشاف الجزيئيات الطافية إلى إثارة مسألة لم تكن في الحسبان، وبصورة مباشرة. هل تُشبه مجموعة ماندلبروت قارة مُتّصلة وتحتوي على أشباه جُزر في أطرافها؟ أم أنه الغبار يحيط بالجسم الرئيسي للمجموعة؟ لم تكن الأمور واضحة. وفي البحث عن الإجابة، لم تُفد الخبرة مع مجموعات جوليا لأنها تحتوي على الأمرين معاً، أي الشكل المُتّصل والغبار. ولأن هندسة التكرار المُتغيّر تتيح لشكل الغبار بالظهور، حيث لا تتشابك قطعتان إحداهما بالأخرى بحكم الفراغ الذي يفصل بينهما، ولكن لا تبقى أي قطعة بمفردها أيضاً، بل ترافقها مجموعة من النقاط الاعتباطية من مسافات قريبة. وكلما أمعن ماندلبروت النظر في صوره، أدرك أن استعمال الكومبيوتر في التجارب لا يوصل إلى إجابة عن هذا السؤال. وركّز كثيراً على تلك المسننات التي تنبثق من الجسم الرئيسي كالأشواك. يختفي بعضها بسرعة، لكن بعضها الآخر ينمو ليُعيد إنتاج الشكل الأساسي في صورة تقريبية. وبدت تلك الأسنان مستقلة أيضاً، على رغم وجود احتمال بأنها

تتواصل عبر خطوط أشد رهافة بحيث أنها لا تظهر ضمن الحسابات التي تُرسم بموجبها النقاط.

لجأ دوادي وهوبارد إلى نوع جديد من الرياضيات لكي يبرهنا أن كل جُزَيْء يمد خيوطاً شديدة الرهافة تصله مع الجسم الرئيسي للمجموعة، بما ينسج شبكة تُشرنق الجسم الرئيسي للمجموعة. ووصف ماندلبروت تلك الشبكة بأنها «الدائن الشيطان». واستطاع دوادي وهوبارد أن يثبتا أن أي قطعة، وبغض النظر عن موقعها وحجمها، قد تُظهر، إذا «كُبِّرت» على نحو مُناسب، جزيئيات جديدة، تُشبه الجسم الرئيسي للمجموعة لكن ليس شبهاً تاماً. إنها ليست تكراراً للشيء نفسه، بل تكرار مختلف لذلك الشيء. وبرهنا أن كل جزيء جديد مُحاطٌ بتلك الخيوط اللولبية والأشكال الشبيهة باللهب، وفي كل منها، إذا كُبِّر أيضاً، تظهر جزيئيات جديدة، دائماً مُتشابهة مع الجسم الذي جاءت منه، ودائماً مختلفة عنه، ودائماً تتطلب مقاييس أصغر فأصغر.

وبدت وكأنها مُعجزة في التصغير، بحيث يحتوي كل تفصيل صغير على الكون كله، ولكنه أيضاً كونه الخاص المختلف، مما يُعطي مزيجاً من المتنوع والكُليّ في آن واحد.

«سارت كل الأشياء في مقترب الخط المستقيم هندسياً». استخدم هاينز-أوتو بيتجن تلك العبارة في وصف الفن الحديث. «يحاول أحد أعمال جوزيف آلبرس، مثلاً، استكشاف العلاقة بين الألوان، بحيث إنه تآلف من مجموعة من المربعات الموضوعة بعضها داخل بعض. لقد لاقت تلك الأشياء رواجاً. إذا نظرت إليها الآن، تحسّ بأن الزمان قد مرّ عليها. لم يعد الناس راغبين فيها. في ألمانيا، شيّدت مبانٍ سكنية ضخمة بالاعتماد على هندسة البوهاوس. وسكنها الناس، ثم هجروها لأنهم لم يحبوا السكنى بتلك الطريقة. وفي نظري توجد أسباب عميقة راهناً، لكراهية المجتمع لبعض مناحي النظرة السائدة للطبيعة». بتلك الكلمات، حاول بيتجن أن يُساعد زائراً على اختيار إحدى اللوحات الكثيرة التي تمثل مجموعة ماندلبروت، ومجموعات جوليا، وغيرها من الأشكال التكرارية المُلوّنة بطريقة راقية. واحتوى مكتبه الصغير في كاليفورنيا على شرائح

عرض ضوئي ورسوم على أوراق شفّافة، وحتى روزنامة مصنوعة بناء لمجموعة ماندلبروت. إن الحماسة العميقة التي تنتابنا راهناً، تتصل بالنظرة المتغيّرة إلى الطبيعة.

ما هو الملمح الحقيقي للشيء الحقيقي؟ ما هو المهم في الشجرة مثلاً؟ هل هو الخط المستقيم، أم الخطوط المتكسرة والمتغيّرة؟ في تلك الأثناء، وفي جامعة كورنيل، غرق هوبارد في سيول من الطلبات التجارية على صور مجموعاته، فأدرك أن عليه صُنع نماذج وكتابة لائحة بالأسعار. لقد خزّن في كومبيوتره عشرات من الصور، وجهّزها للعرض لكي تُساعد الخريجين على تذكّر التفاصيل التقنية. وفي المقابل، فإن أكثر الصور مشهدية، بالوضوح الأشد والألوان الأكثر حيوية، جاءت من الألمانيين بيتجن وبيتر ريختر اللذين قادا فريقاً علمياً في جامعة بريمن، بتمويل حماسي من مصرف محلي.

أرسى بيتجن وريختر، وهما عالم رياضيات وفيزيائي على التتالي، مستقبليهما مهنياً على مجموعة ماندلبروت. وبالنسبة إليهما، حملت تلك المجموعة كوناً بأسره يضمّ فلسفة الفن الحديث، والدور الجديد للتجربة في الرياضيات، وطريقة عرض النُّظُم المُعقّدة على عامة الناس وغيرها. ونشرا كتيبات مُصوّرة بطباعة فاخرة. وسافرا إلى أنحاء العالم حاملين معرضاً لصور الكومبيوتر.

تعرّف ريختر على النُّظُم المُعقّدة من الفيزياء، ثم عبر بها إلى الكيمياء ثم إلى الكيمياء الحيوية. فتوصّل إلى درس التذبذب في المسارات البيولوجية. وفي سلسلة من الأوراق العلمية التي تناولت ظواهر مثل جهاز المناعة، وتحوّل السُّكّر إلى طاقة بواسطة الخمائر، استنتج أن التذبذب كثيراً ما يسيطر على ديناميكيات العمليات التي وُصفت تقليدياً بأنها «ساكنة». وأرجع ذلك إلى سبب وجيه مفاده أن النُّظُم الحيّة لا يصعب اختبارها بطريقة تُظهر الوضع الذي تكونه إبان عملها طبيعياً.

على حافة نافذة في مكتبه، ثبّت ريختر بندولاً مزدوجاً من نوع خاص، صنع في مختبر الآلات في جامعته. وسماه ريختر «حيوان النظام الديناميكي الأليف». وبين حين وآخر، وعلى سبيل التجربة العلمية، عمد ريختر إلى إطلاقه بحيث يتأرجح بطريقة غير منتظمة،

ثم يحاكي دورات التأرجح على كومبيوتره. كان بندولاً شديد الحساسيّة، حتى أن الحسابات التي يجريها الكومبيوتر عن دورات تأرجحه المرهفة كانت تتأثّر بشدّة بالظروف عند بداية التجربة. ولإعطاء فكرة عن تلك الحساسيّة، يكفي القول إن أثر نقطة مطر على بعد ستين ميلاً، كانت ستؤثر على محاكاة الكومبيوتر لتأرجح البندول خلال خمسين أو ستين دُورة، أي خلال دقيقتين. وأظهرت الصور البيانية الملونة التي صنعها الكومبيوتر عن تأرجح هذا البندول المزدوج، تداخل مناطق الانتظام والفوضى. ولذا، استخدم ريختر تقنيات صنع تلك الصور، لإظهار المناطق التي تصبح فيها الجاذبية مثالية في المعادن المُمغنطة، وكذلك لاستكشاف مجموعات ماندلبروت.

وأتاحت دراسة آلية التعقيد لزميلة بيتجن الفرصة لخلق تقاليد علمية، بدلاً من الاقتصار على حلّ المسائل. «إنه حقل علمي جديد كلياً، بحيث أنه يمكنك طرح إشكاليات والتوصّل إلى حلول لها خلال أيام أو ربما شهر»، بحسب ما قاله بيتجن. لم يكن موضوعاً منظّماً، أي أنه لم يكن حقلاً علمياً معروفاً له قواعد مرساة ومعروفة سلفاً. وعبر عن ذلك بيتجن بالقول: «في الحقل المنظّم، يعرف الجميع كل ما هو معلوم ومجهول فيه؛ كما يجب أن تتناول المسائل غير المحلولة والتي يسود اتفاق على أهمية حلها». وشارك بيتجن أنداده من علماء الرياضيات في عدم الارتياح إلى استخدام الكومبيوتر في إجراء التجارب. ففي تلك الحال، يُفترض أن يجري التثبّت من النتائج بطريقة منضبطة ومنسجمة مع المناهج القياسية المستخدمة في الحلّ، وإلا فإنها لن تعتبر جزءاً من علم الرياضيات. وفي المقابل، فإن ظهور صورة على شاشة البيانات للكومبيوتر لا يعني بالضرورة أنها تتطابق مع منطق الفرضية والإثبات لعلوم الرياضيات. لذا، يمكن فهم الأثر العميق الذي تركه الكومبيوتر في التفكير الرياضياتي عموماً؛ لأن مجرد ظهور توافر صورة بيانية عن مشكله معيّنة في الرياضيات يعطي الانطباع بأنها نوع من الحلّ، وبالتالي فإن هذا أحدثَ أثراً عميقاً فغيّر في تطوّر الرياضيات. لقد أعطى الكومبيوتر الرياضياتيين القدرة على السير بحرية في مسارات طبيعية، بحسب اعتقاد بيتجن، لأنه أمكن تأجيل

البحث عن إثبات ولو بصورة موقّتة. وبذا، حدث نوع من التشابه بين علمي الرياضيات والفيزياء، بحيث صارا يسيران وراء خطى التجربة ومساراتها. لقد فتحت طرق واعدة في البحث بفضل قوة الحوسبة في الكومبيوتر، والمفاتيح البصرية التي تعطيها الصور للحدس.

وبات بإمكان عالم الرياضيات الاعتماد على تلك الطرائق، ثم العودة لاحقاً لإثبات ما يتوصل إليه عبر أسلوب الفرضية والإثبات. وعبّر بيتجن عن ذلك بالقول: «إن الصرامة هي قوة الرياضيات، لأنها تعطيها القدرة على التتبع الصحيح للتفكير ومساراته. ومع الكومبيوتر تغيّرت الأشياء بحيث صار بإمكانك التأمّل في أوضاع غير مبرهنة إلا بصورة جزئية، وأن تترك مسألة الصرامة في البرهان إلى الأجيال المقبلة». وفي الثمانينيات من القرن العشرين، كان بإمكان الكومبيوتر المنزلي أن يعطي حلولاً لمسائل في الرياضيات عبر صور ملوّنة، تُصنع عبر نظرية المجموعات العددية. وسرعان ما خطر في بال هواة ذلك العلم أنه يمكن استكشاف تلك الصور؛ بفضل التكبير المستمر لتفاصيلها الدقيقة؛ للحصول على تصوّر أوّلي عمّا تكونه الأمور عند مستويات مختلفة ومتفاوتة. لنفرض أنه نُظِر إلى المجموعة العددية باعتبارها تُمثّل جسماً بحجم الكوكب السيّار، عندئذٍ يصبح باستطاعة صور الكومبيوتر أن تُظهر ذلك على مستوى الكوكب كلّه، ثم على مستوى المدينة، ثم على مستوى المبنى، ثم على مستوى الغرفة، ثم الكتاب ثم الحرف ثم البكتيريا ثم الذرّة. إن هؤلاء الهواة، وكذلك الذين تبنّوا هذا النمط من التفكير، إنما افترضوا أن الأشياء تبقى هي ذاتها عبر المستويات المختلفة بقياساتها المتفاوتة، والتي يمكن إنتاجها باستخدام برامج بسيطة تحتوي على أسطر قليلة من الشيفرة التي يفهمها الكومبيوتر(*).

(*) لصنع مجموعة ماندلبروت، لا يحتاج الكومبيوتر غير برنامج صغير مؤلف من الأشياء الأساسية في تلك المجموعة. ويرتكز البرنامج على المُعادلة الأساسية التي تتحكم بالمجموعة. وتقضي تلك المُعادلة بأن يُضرب رقم ما بنفسه، ثم يُجمع إلى حاصل عملية الضرب. لنفترض أن الرقم هو اثنان. يُضرب بنفسه، فيُنتج حاصلاً مقداره أربعة. ثم يضاف ذلك الرقم عينه (إثنان) إلى حاصل ضربه بنفسه (أربعة) فتكون النتيجة ستة. =

ينفق برنامج الكومبيوتر، عند صنعه لمجموعة ماندلبروت، وقتاً طويلاً عندما يتعلّق الأمر برسم الحدود بين الحلول المختلفة. وكذلك تُبيّن تلك الحدود «التسويات» الكثيرة التي تتضمنها تلك المجموعة عينها. لنفترض أن الكومبيوتر كرّر العمليات الحسابية لمُعادلة مجموعة ماندلبروت مئة أو ألف أو عشرة آلاف نقطة داخلها، لا يضمن ذلك أنّ النقطة التالية لن تقع خارجها. ماذا يحدث لو تكررت العمليات الحسابية مليون مرة أو أكثر؟ من يضمن النتائج؟ لذا، مال الذين أرادوا صنع صور مشهدية عن تلك المجموعة، للاستناد في عملهم إلى الكومبيوترات الضخمة، أو تلك التي تستعمل أسلوب «الحوسبة المتوازية». وللشرح، فإن الفرق بين الحوسبتين العادية والمتوازية هو كالفرق بين ربط مجموعة من البطاريات التي تعمل بالتيار المباشر على التوالي وربطها على التوازي. ففي الحال الأخيرة، تتضاعف قوة التيار، كما لا يؤدي انقطاعه في نقطة مُعينة إلى توقّف عمل النظام كله.

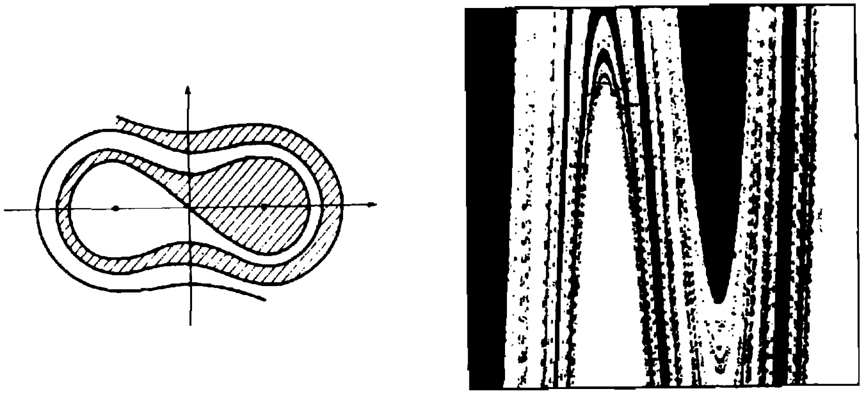
ويدخل الرقم الذي ينتج من الخطوة الأولى إلى المُعادلة عينها، فتُعاد عليه مُجدداً عملية ضربه بنفسه (أربعة ضرب أربعة يساوي ستة عشر)، ثم يُضاف إلى الحاصل (ستة عشر زائد أربعة يساوي عشرين). وبذا يُصبح الرقم العشرون هو بداية الخطوة الثالثة حيث تُعاد خطوات المُعادلة مُجدداً وهكذا. وتنعقد دائرة مُغلقة تدخلها الأرقام باستمرار إلى ما لا نهاية.

والحق أن المُعادلة الأساسية في مجموعة ماندلبروت تتعامل مع الأرقام باعتبارها مُركّبة، أي مكونة من قسمين حقيقي ووهمي. وتُجرى الحسابات عليها بالطريقة التي سبق وصفها. وأثناء الحساب، يرسم الكومبيوتر الأرقام نقاطاً متصلة على سطح الأعداد المُركبة. ويعطي ذلك مفتاحاً أيضاً للخروج من الدائرة المُغلقة لتلك المُعادلة. فعندما يتجه المجموع الكلي يتجه بسرعة نحو اللانهائي، مما يعني أن الخط المُعبر عنه على سطح الأعداد المُركبة يبتعد بسرعة عن مركز المسطح، يُقرّر الكومبيوتر أن هذا الرقم (وبالتالي تلك النقطة) لا تنتمي إلى مجموعة ماندلبروت، فيتركها. أما إذا تكررت عمليات الحساب من دون أن يخرج الرقم عن اثنين (سلباً أو إيجاباً، وسواء في الشق الحقيقي أو الوهمي)، فإن تلك النقطة تنتمي إلى مجموعة ماندلبروت. وبالمرور إلى المقاييس المختلفة، التي تضمن عملية التكبير، يمكن العبور إلى أرقام مضاعفة عشرات المرات، بل مئاتها وآلافها. ويستطيع الكومبيوتر العادي أن يتعامل مع التكبير مقدار ألف مرة بطريقة آمنة. ويُكرّر برنامج الكومبيوتر تلك العملية عينها بالنسبة لآلاف النقاط المُجمعة. ويُظهر النتيجة على شكل نقاط تتجمع في خطوط ذات أشكال لا حصر لها. ومن المستطاع إضافة الألوان إلى تلك العملية، فتعطي رسوماً مُذهلة، خصوصاً أنها تتحرك بطريقة متواصلة عبر مقاييس متغيرة، وكذلك فإنها نفسها تتغير باستمرار، على رغم تشابهها الناجم من تقاربها عددياً، ولكنها لا تكرر نفسها البتة.

وعلى غرار ذلك، فإن إسناد العمليات الحسابية إلى كومبيوترات تعمل على التوازي يؤدي إلى تقسيم العمل إلى أجزاء صغيرة يتولّى كل حاسوب أمرها باستقلالية تامة، وبذا يُستفاد من قوة المجموعة كلها، ولا يؤدي توقف أحدها إلى توقف العملية بأسرها. وبهذه الطريقة، يتبيّن أن الحدود بين الحلول في مجموعة ماندلبروت تتألف من النقاط التي تتباطأ العَملية عندها، فتبدو النقاط وكأنها «تقاوم» جذب بقية نقاط المجموعة. وبكلام آخر، كأن نقاط الحدود تخضع لتأثير متوازن بين نقطتي جذب، إحداهما الصفر والأخرى هي ما «يمط» المجموعة باتجاه اللانهائي.

عندما انتقل العلماء من الاشتغال على مجموعة ماندلبروت نفسها إلى العمل على مجموعة من المسائل الرياضية التي تُمثّل ظواهر فيزيائية فعلية، اندفعت قضية حدود المجموعة إلى المقدمة. وأعطت الحدود بين الجواذب الغريبة في النُّظُم الديناميكية تمثيلاً لمجموعة من العمليات الفيزيائية الفعلية تمتد من تكسّر المواد أثناء عمل الآلات وصولاً إلى القدرة على حسم التردد الإداري أثناء عملية اتخاذ القرار. وتبيّن أن كل جاذب يُكوّن نوعاً من الحوض يشبه الحوض الذي يصنعه النهر عند مصبه. ولكل حوض نهري حدود.

وبالنسبة إلى مجموعة بارزة من العلماء في ثمانينات القرن العشرين، لاح أن أكثر مجال واعد علمياً يتمثّل في درس تلك الأحواض النهرية، بحدودها التكرارية المتغيّرة (الفراكتالية)، التي ترسمها الجوذاب الغريبة في النُّظُم الديناميكية. ولم يُكرس ذلك المجال نفسه لدرس حال الثبات في النظام، بل اهتمّ بالطرق التي «يحسم» فيها النظام «تردده» بين الخيارات المتنافسة. ومثلاً، يملك نظام لورنز جاذباً وحيداً. ولذا، يميل النظام إلى الانقياد لسلوك مُعين عندما ترسو أموره قرب ذلك الجاذب، مما يولّد سلوكاً فوضوياً لأن الجاذب هو فوضوي. وفي نُظُم أُخرى، قد ترسو الأمور على حال من السلوك المستقر، وغير الفوضوي، ولكن مع وجود أكثر من احتمال للسلوك المستقر. وتماهت دراسة أحواض الجواذب الغريبة مع دراسة النُّظُم التي تستطيع «اختيار» حال



أحواض نهرية عند حدود الحلول: حتى عندما يتبع نظام ديناميكي سلوكاً منتظماً على المدى الطويل، فإن الكايوس يظهر عند الحدود التي تفصل بين حالة مستقرة وأُخرى. وكثيراً ما تمتلك النُظُم الديناميكية أكثر من حال توازن، مثل «رقّاص الساعة» الذي قد يتوقف عند أحد المغناطيسين المثبتين في قاعدته. ويُمثّل حال الاستقرار جاذباً غريباً، ولذا تكون الحدود بين حالي الاستقرار مُعقّدة، ولكنها سلسة في انتقالها من حال استقرار إلى آخر (إلى اليسار). تمثل المساحات المُتشابكة التي يتداخل فيها اللونان الأبيض والأسود (إلى اليمين) فضاء الحال «للرقّاص». وتُظهر أن «الرقّاص» يسير إلى أحد الحالين المستقرين، بحيث يكون مساره متوقعاً أحياناً وفوضوياً في أحيان أُخرى.

مُعينة من مجموعة حالات نهائية غير فوضوية، وهذا ما أثار سؤالاً عن إمكان توقع ذلك الخيار. يُعتَبَر جايمس يورك، من الرواد الذين درسوا الأحواض الفراكتالية خلال العقد الذي تلا تكريس نظرية الكايوس. وضرب مثلاً على رؤيته لتلك الأحواض، بتخيّل آلة افتراضية للعب كرة الحديد، المعروفة باسم «فليبرز».

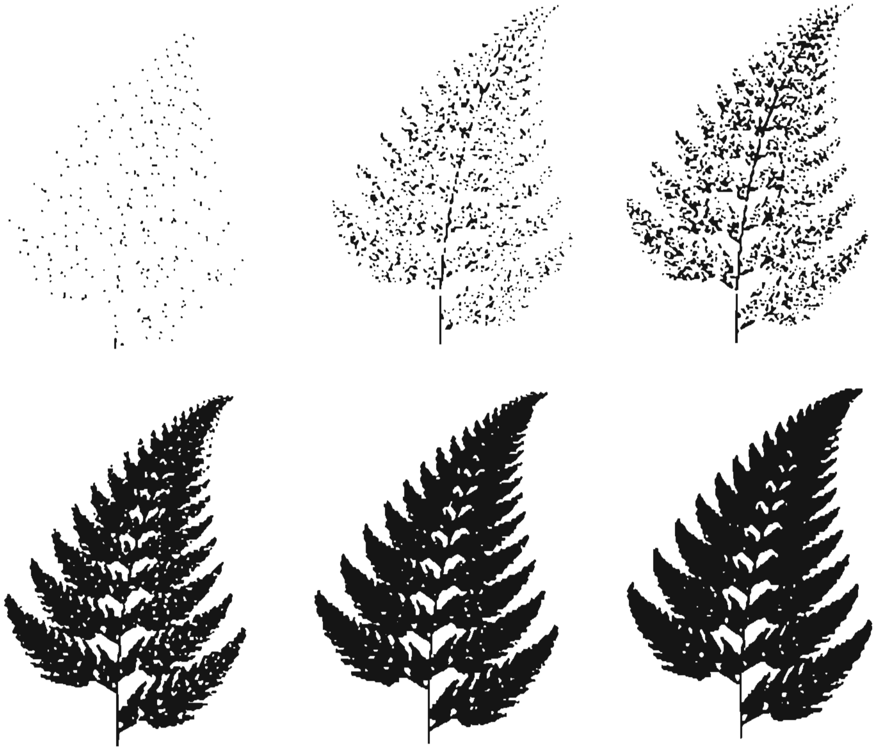
فعند إطلاق الكرة، تُشد عصا حديد مثبتة في زنبرك إلى الخلف، فينضغط الزنبرك. ثم تُطلق، فينفرد الزنبرك وتضرب العصا الكرة الحديد وتُطلقها. وتسير الكرة لتصطدم اعتباطياً بمجموعة من الأماكن، التي تتضمن حوافي مطاطية مشدودة ومضارب حديد. وفي كل ارتطام، تُرفس الكرة فتكتسب طاقة جديدة. وتعني الرفسة أن الطاقة في النظام لا تتواهن. ولأجل تبسيط آلته الافتراضية، لم يثبّت يورك مضارب في أسفلها، بل جعل بدلها مخرجين للكرة، بحيث يتعيّن عليها أن تختار بين أحدهما. وتسير الكرة في تلك الآلة المفترضة، بصورة حتمية. ويتحكم بمسار الكرة عنصر وحيد: مُعطيات الوضع الأصلي

لضربة العصا الحديد. لنفترض أن جذب عصا الضرب لمسافة قصيرة يؤدي دوماً إلى وصول الكرة الحديد إلى المخرج اليمين، فيما يؤدي جذب العصا إلى أقصى مدى لخروج الكرة عبر المخرج اليسار. في الحالات الوسيطة بين الجذبين القصير والطويل، يصبح سلوك الكرة مُعقّداً بحيث تترافسها مكوّنات الآلة، مع كل الضجيج والصخب الذي يُضاحب تلك العملية، لتصل إلى أحد المخرجين.

لنتخيّل أننا نرسم منحنى بيانياً لكل واحد من النتائج التي تنجم من كل وضع أصلي للعصا التي تضرب الكرة في تلك الآلة المُفترضة. لا يزيد ذلك المنحنى على خط مستقيم. إذا خرجت الكرة عن اليمين (أي استجابت لشدّ الجاذب اليمين)، نضع نقطة حمراء، ونضع كذلك نقطة خضراء بالنسبة لليسار (بمعنى استجابتها للجاذب اليسار).

ما الذي نتوقع أن نتوصل إليه في رسم بياني عن علاقة الجاذبين مع معطيات الوضع الأصلي؟ ترتسم الصورة على نحو تظهر فيه الحدّ الفاصل بين الحلّين اللذين يمثّلهما الجاذبان، على هيئة مجموعة بصفات فراكتال، ربما لا تتشابه مع ذاتها لكنها تعطي تفاصيل لا نهائية. بعض مناطق الحدّ تكون حمراً والأُخرى خضراً. ومع التكبير، تظهر مساحات حمر في المناطق الخضر والعكس صحيح أيضاً. ويعني ذلك أن بعض الحلول تعتمد على الأوضاع الأصلية بطريقة حسّاسة، بحيث يؤدي التغيير الهيّن في الأوضاع الأصلية إلى دفع النظام (أي حسم الخيار) نحو أحد الحلّين.

ولإضفاء بُعْد جديد، يمكن إضافة عنصر جديد (أي درجة ثانية من الحرية) يتدخل في مسار الكرة، كأن يكون تغيير زاوية الانحدار في الآلة. وكرّة أُخرى، فإن بعض المخارج (أي الحلول) تُظهر اعتماداً حسّاساً على التغيير الهيّن في زاوية الانزلاق، باعتبارها معطيات أولية في النظام، فتُصبح بُعداً جديداً يُضاف إلى ذلك الذي يظهر في الاعتماد الحساس للحلول على التغييرات الهيّنة في ضربة العصا، باعتبارها مُعطيات أولية في النظام أيضاً. ويزيد في تعقيد الصورة التأثير المتبادل لكل مُتغيّر على الآخر، إذ يؤثر التغيير في أحدهما على المخرج الذي يصل إليه النظام بتأثير التغيير في الآخر. ماذا لو



لعبة الكايوس: كل النقاط الجديدة تقع اعتباطياً، لكن صورة شتلة التبغ تشرع تدريجاً في الظهور. ولا يزيد حجم برنامج الكومبيوتر عن تلك اللعبة، على بضعة أسطر.

أُضيف متغيّر ثالث أو رابع ؟ تُعطي هذه الصورة الفوّارة من التعقيد نموذجاً للكوابيس التي يعيشها المهندسون المشرفون على النُظُم الحسّاسة التي تعتمد على أكثر من متغيّر وحيد، مثل شبكات الطاقة الكهربائية والمفاعلات النووية. ومنذ ثمانينات القرن العشرين، باتت الشبكات والمُفاعلات محطاً لدراسات هائلة تنطلق من نظرية الكايوس. فبحسب الرياضيات المُعتمدة على المُعادلات الخطيّة، يؤدي التبدل في قيمة متغيّر مُعيّن إلى تبدل مُحدد في المتغيّر الآخر. أما بالنسبة إلى الرياضيات اللاخطيّة التي تعتمدها نظرية الكايوس، فإن العلاقة بين المتغيّرين هي أشد تعقيداً بكثير.

وفي بعض المؤتمرات العلمية، عرض يورك صوراً عن الهندسة الفراكتالية لأحواض الجواذب الغريبة عند الحدود. ومثّلت بعضها سلوك «رقّاص الساعة» المُتحكّم في حركتها بحيث تصل إلى حلّ (أي مخرج) مُحدّد. ويعطي «رقّاص الساعة» المُتحكَّم به نموذجاً عن مجموعة كبيرة من النوابض المتذبذبة ونُظُمها في الحياة اليومية. وبحسب تعبير يورك: «لا أحد يستطيع وصف «رقّاص الساعة» المُتحكّم به بأنه شيء نافر إذ تمتلئ الطبيعة بنُظُم تُشبهه. ولكنه لا يتآلف مع الأمثلة التي تدرسها الرياضيات الكلاسيكية، لأنه نظام من هندسة الفراكتال المتوحشة». تُظهر صور يورك خطوطاً لولبية سوداً وبيضاً متداخلة بطريقة فائقة التعقيد والتغيير. ولصنعها، يتعيّن على الكومبيوتر تكرار العمليات الحسابية بمعدل ألف نقطة في كل واحد من ألف تجمع. ويمثّل كل تجمع واحداً من الأوضاع التي يمر بها «الرقّاص» المُتحكَّم به والذي رُسمت حركته بالخطوط البيض والسود. وتُظهر الصور أحواض الجواذب، متمازجة وبطبقات عدّة، بما يتفق مع رؤية الفيزياء النيوتنية.

لكن دراسة الحدود بينها تُظهر فشل تلك الرؤية في شرح تعقيدات حركة «الرقّاص». وكثيراً ما يظهر أن ثلاثة أرباع النقاط متجمعة عند الحدود التي تتبع مسارات الهندسة الفراكتالية. وأعطت صُوَر يورك خُلاصات مهمة للباحثين والمهندسين. إذ كثيراً ما واجه هؤلاء التحدي المتمثّل في ضرورة تخمين السلوكيات المُحتملة للنُّظُم المُعقّدة، بالاستناد إلى كمية ضئيلة من المعلومات. وعندما يعمل النظام بطريقة طبيعية، أي أنه يبقى محكوماً بمجموعة صغيرة من المُتغيّرات، يجمع المهندسون ملاحظاتهم ويأملون في التوصّل إلى استنتاجات عن السلوك اللامنتظم بطريقة خطيّة. وفي المقابل، فإن العلماء الذين يدرسون أحواض الجواذب الغريبة عند الحدود بين أحوال الانتظام واللاانتظام، يعلمون أن سلوك النظام يُصبح أكثر تعقيداً مما قد تتوقعه حتى أشد الخيالات جموحاً. ويشرح يورك ذلك الأمر بالقول: «نستطيع النظر إلى شبكات الكهرباء المترابطة عند الساحل الشرقي للولايات المتحدة، باعتبارها نظاماً متذبذباً. . .إنه مستقر معظم الوقت بحيث تظن

أنك تستطيع توقّع ما الذي يحدث عند اضطرابه... لكن دراسة أحواض الجواذب عند حدود الانتقال بين الانتظام والفوضى، تُكذّب ذلك الظن... الحق أنك لا تستطيع أن تتخيّل درجة تعقيد تلك الحدود».

وألقت أحواض الجواذب ضوءاً جديداً على مسائل عميقة في الفيزياء النظرية. فقد جسّدت المراحل الانتقالية نوعاً من الحدود الفاصلة بين ظواهر مختلفة نوعياً. وتمعّن ريختر وبيتجن في واحد من أشهرها: مغنطة المعادن التي تعني انتقالها من ظاهرة المعادن العادية إلى المغناطيس. وأظهرت صورهما عن حدود مرحلة الانتقال تعقيداً جميلاً وغرائبياً ويحمل شبهاً مع شكل طبيعي معروف، إذ شابهت شكل نبتة الملفوف مع أوراق متداخلة ومُجعّدة. وعمدا إلى تبديل عدد المتغيّرات، إضافة إلى الزيادة في التكبير للتفاصيل. وفي قلب إحدى الصور، التي ظهرت في البداية فائقة الشوشرة والتخبط، أخذ شكل مألوف في البروز: مجموعة ماندلبروت، بكل أشكالها اللولبية المتشعبة وبراعمها وذرّاتها. وذهل العالمان، فكأنهما رأيا سحراً مبيناً.

سلك بارنسلي درباً مختلفة. إذ فكّر في صور الطبيعة ذاتها، وخصوصاً الأنماط التي تولّدها الكائنات الحيّة. وأجرى اختباراته باستعمال «مجموعات جوليا» وأدوات أخرى، في محاولة لتوليد طيف واسع من التعقيد الموجود طبيعياً. ثم خلص إلى استعمال الاعتباطية أساساً لطريقة جديدة في صنع نماذج عن الأشكال الطبيعية. وسمّى طريقته «التصنيع الشامل للأشكال الفراكتال بواسطة نُظُم الإعادة المتكررة لحساب المُتغيّر». وسرعان ما اختصرها بعبارة «لعبة الكايوس».

لكي تنطلق لعبة الفوضى بسرعة، تحتاج إلى كومبيوتر يتمتع بشاشة قادرة على التعامل مع الرسوم البيانية المُعقّدة، ومُولّد للأرقام الاعتباطية. وكذلك يمكن تقليدها باستعمال قلم رصاص وقطعة نقد معدنية. تستطيع البدء من أي نقطة، ثم اختراع قانونين، أحدهما لرسم الرأس والآخر للذيل.

يُخبرك القانون كيف تنقل نقطة إلى أُخرى. مثلاً يمكن اعتماد قانونين على النحو

الآتي: «تحرك بوصتين إلى الشمال الشرقي» و «تحرك باتجاه المركز بمقدار ٢٥ في المئة». إبدأ برمي قطعة النقد لكي تختار القانون الذي تتحرك بموجبه عند كل نقطة. إذا تجاهلت الخمسين رمية الأولى، تشرع لعبة الكايوس بإعطاء شكل، وليس نقاطاً متفرقة. ويزداد الشكل وضوحاً مع الاستمرار في اللعب.

واستنتَج بارنسلي من لعبة الفوضى الفكرة القائلة بأنه يمكن النظر إلى مجموعات جوليا، وكذلك الأشكال الفراكتالية الأُخرى، باعتبارها مخرجاً للعمليات الحتمية، ولكنها تستطيع أيضاً أن ترسم حدود العملية الاعتباطية.

ويُعطي بارنسلي تشبيهاً مثيراً عن العملية السابقة. ويشبهها برسم خريطة كبيرة للجزر البريطانية على أرض غرفة بالطباشير. يصعب على مسّاح تقليدي معرفة المساحة الفعلية للخريطة، لأن سواحل الجزر تتبع هندسة التكرار المتغيّر. وفي المقابل، يمكن رمي حبات أرز في الهواء الحبة تلو الأُخرى، وبصورة عشوائية، ثم احتساب عدد الحبّات التي تسقط داخل الخريطة.

وبصبر كاف، تُعطي الحبّات رقماً عن مساحة ذلك الشكل، يصلح لأن يكون حدّاً بين الاعتباطية والطريقة المنتظمة في القياس. وفي النُّظُم الديناميكية، تُماثل رسوم الجُزر الجواذب الغريبة. وتستفيد لعبة الكايوس من خاصية التكرار المتغيّر لصور مُعينة، أي خاصية أنها مصنوعة من نُسخ صغيرة عن الصورة الرئيسية. وتُماثل عملية اختراع مجموعة من القوانين ثم استعمالها تكراراً، أكثر المعلومات عمومية عن شكل ما، فيما يُناظر التطبيق التكراري للقوانين المعلومات التي لا تتعلق بالمقاييس. وكلما كان الشكل أكثر إيغالاً في التكرار المُتغيّر، لزمه قانون أكثر بساطة. وسرعان ما وجد بارنسلي أنه يستطيع إعادة إنتاج الأشكال كلها التي ابتكرها ماندلبروت. لقد اعتمد ماندلبروت على تتابع لا نهائي من الانشاء والتدقيق. وتُصنع الأشكال المتضمنة في «حِشيَة سيرينزكي» وأشكال ندف الثلج عند كوخ، بعملية بسيطة تتضمن حذف قسم من خط مستقيم، وإحلال شكل مُحدّد محله. وباستعمال لعبة الفوضى، بدل ما سار عليه الثلاثة

الــمذكــورون، صنــع بــارنســلــي صــوراً تبدو مُبهمة في البداية، لكنهــا تتوضح باستمرار.

ولا يتطلب الأمر عمليات تدقيق، بل مجموعة وحيدة من القوانين التي، بطريقة ما، تنزرع في الشكل النهائي. وعكف بارنسلي ورفاقه على صنع برنامج متطور، بحيث ينفلت في رسمُ صور بلا حدود بأشكال الملفوف والوحل والطحالب. وبرز سؤال مهم عن كيفية السير في الاتجاه المُعاكس، بمعنى الانطلاق من الشكل النهائي، ثم العثور على القوانين الملائمة لصنعه. وتوصل بارنسلي إلى إجابة عبر ما سمّاه «نظرية الكولاج»، التي تصف قانوناً بسيطاً على نحو لا يُصدّق. يمكن البدء من الشكل المطلوب رسمه. ثم استعمال فأرة الكومبيوتر لصنع نسخة مُصغّرة عنه، ثم تُستنسخ باستمرار. ثم يوضع الشكل الأساسي في مجموعة النُّسخ المُصغّرة عنه. إذا كان الشكل النهائي فراكتالياً بشدة، يسهل رؤية العلاقة بين الشكل الكبير ونُسخه الصغيرة. ويصعُب الاستنتاج بالنسبة إلى أقل الأشكال الأقل فراكتالية. لكن، وباستعمال التقريب، يمكن الوصول إلى تلك العلاقة.

ووصف بارنسلي ما توصّل إليه بالقول: «إذا كانت الصورة مُعقّدة، تُصبح القوانين مُعقّدة... في المقابل، إذا تضمنت الصورة شكلاً تكرارياً متغيّراً فيها، مع تذكُّر ملاحظة بنواه ماندلبروت عن امتلاء الطبيعة بالأشكال الفراكتال، يصبح مُستطاعاً التوصل إلى حلّ شيفرتها عبر عدد قليل من القوانين...إذاً، يُصبح الأمر أكثر إثارة للاهتمام من الصورة التي رسمتها الهندسة الإقليدية، لأننا نعلم أن حافة ورقة الشجر ليست خطّاً مستقيماً». وفي تجربة أولى، صنع ماندلبروت رسماً لنبتة التبغ بواسطة كومبيوتر صغير. وتطابقت رسمته مع الصورة التي تظهر لتلك النبتة في الكُتب الأكاديمية.

ولاحظ ماندلبروت أن ما رسمه متقن ومماثل للأصل حتى إن أي عالم في البيولوجيا لا يخطئ في التعرّف إليه.

وبمعنى ما، افترض بارنسلي أن الطبيعة تُمارس نسختها الخاصة من «لعبة الكايوس». وقال: «يحتوي البرعم على معلومات تكفي لصنع شتلة... إذاً، يوجد حدّ لدرجة التعقيد

في تركيبة الشتلة. وليس مُفاجئاً أن تُرسم شتلة بهذا العدد القليل من المعلومات... المُفاجأة لو كانت الأمور عكس ذلك».

إذاً، هل تُشكّل المُصادفة عنصراً ضرورياً؟ فكر هوبارد أيضاً في التماثلات بين مجموعة ماندلبروت وطريقة انتقال المعلومات في شيفرة الكائنات الحيّة. وتوصّل إلى رفض القول إن تلك الشِيفرة تعتمد على عنصر المُصادفة.

وبحسب رأيه: «لا توجد اعتباطية في مجموعة ماندلبروت... لا توجد الاعتباطية في أي من الأشياء التي أعمل عليها... ولا أعتقد باحتمال وجود أي دلالة للاعتباطية في البيولوجيا... إن الفوضى في البيولوجيا هي الموت... الكايوس موت... كل الكائنات الحيّة منظمّة بدقة عالية...وعندما تستنتسخ نبتة، تستنتسخ النسق المُنظّم الذي يتضمنه ظهور البراعم والأوراق... وتخضع مجموعة ماندلبروت مُخطّطاً فائق الانضباط والتنظيم، بحيث لا يترك شيئاً للمصادفة... أعتقد بشدة أنه في اليوم الذي يستطيع فيه أحد ما التوصّل إلى فهم التركيب الدقيق للدماغ، فلسوف يُفاجأ بالتنظيم الاستثنائي الدقة المُتضمّن فيه... في البيولوجيا، لا تزيد الاعتباطية عن كونها محض رد فعل منعكس».

وفي السياق عينه، من الملاحظ أن المصادفة تلعب دور الأداة في تقنية بارنسلي؛ أما النتائج فإنها حتمية وقابلة للتوقّع.

وعندما تشرع نقاطها في الظهور على الكومبيوتر، يُصبح التنبؤ بمواقع ظهورها صعباً لأنه يتوقف على الطريقة التي «ترمي» فيها الكومبيوتر قطعة النقد لاختيار القانون الذي يلائم الخطوة التالية، ومع ذلك تستمر النقاط في التدفق ضمن الحدود اللازمة لرسم الشكل النهائي. ولذا ينفي بارنسلي أي دور أساسي للمصادفة. «يشبه القول بالاعتباطية سمك الرنكة الأحمر... تتمحور المسألة المركزية حول الحصول على صور بمقياس يستطيع التعامل مع الأشياء ذات الهندسة التكرارية المُتغيّرة. لكن الأشكال نفسها لا تعتمد على الاعتباطية... فمع الاحتمال الأول، تصل دوماً، وبصورة حتمية تعكس قانوناً صارماً، إلى الصورة نفسها... إنها (أي تقنية بارنسلي) تعتمد على الوصول إلى معلومات معمقة

عبر تقصّي الشكل الفراكتالي بجداول حسابية دقيقة تُستعمل بطريقة اعتباطية... عندما تدخل إلى غرفة جديدة، تتراقص أعيننا أثناء تجوالها سريعاً فيها، بهدف مسحها والتعرّف إليها، كما لو كانت تتحرك اعتباطياً؛ ثم نخرج بفكرة عن الغرفة. لم تتغيّر الغرفة. إن الأشياء موجودة بمعزل عما نفعله».

وفي هذا المعنى، فإن مجموعة ماندلبروت موجودة فعلياً.

لقد وُجدت قبل أن يشرع ريختر وبيتجن في تحويلها إلى فن، وقبل أن يفهم هوبارد ودوادي جوهر الرياضيات، بل حتى قبل أن يكتشفها ماندلبروت. لقد وُجدت بمجرد أن شرع العلم في صوغ سياق، أي عندما صُنع إطار من الأرقام المُركّبة، وأُضيف إليه مفهوم إعادة حساب المُعادلات. ثم انتظرت من يكتشفها. أو لعلها وُجدت في أوقات أبكر، عندما شرعت الطبيعة في الانتظام عبر قوانين فيزيائية بسيطة، لكنها تتكرّر بصبر لا متناهٍ، مع إصرارها على أن تكون نفسها دوماً.

جماعة النُّظُم الديناميكية

«إن التواصل عبر الفجوة التي تُحدثها ثورة العلم، محكوم بأن يكون جزئياً».

مايكل كون

شكّلت «سانتا كروز» الحرم الجامعي الأحدث في جامعة كاليفورنيا. وقد انحفرت على خلفية مشهد يُشبه ما تُقدّمه كتب القراءة في المدارس. وقيل كثيراً إنها أشبه بالمحمية الطبيعية منها إلى الجامعة. واحتمت مبانيها بأشجار حمر لم تمسها يد المهندسين، انسجاماً مع الحماسة المستجدة للبيئة. وتعرّجت قادوميتها الداخلية الضيّقة. واستقر الحرم الجامعي على قمة رابية، تُشرف على مياه «خليج مونتيري» في جنوبها. افتتح «سانتا كروز» في العام ١٩٦٦. وخلال بضع سنوات، صار الحرم الجامعي الأكثر نخبوية في جامعة كاليفورنيا. وسعى الطلبة للالتحاق بها، وفي أذهانهم أسماء نُخبتها المتألّقة. فقد حاضر فيها مثقفون مثل نورمان براون وغريغوري باتسون وهربرت ماركوز. وأحيا توم ليهرر حفلاً غنائياً فيها. ونُظُر إلى «سانتا كروز» باعتبارها مغامرة علمية، بما في ذلك كلية الفيزياء فيها.

انطلقت تلك الكليّة بفضل جهود خمسة عشر عالماً شاباً تمتعوا بطاقة هائلة للعمل وبجرأة في التفكير، إذ تأثروا بالأيديولوجيات المتحررة التي سادت في ستينات القرن العشرين. واجتمعت تلك الخصال مع المستوى العلمي الرفيع لجامعة كاليفورنيا، مما ولّد جواً من الجدية والالتزام بالمعايير العلمية. ولم تكن جدية الخريج روبرت ستيتسون شو، المقيم في بوسطن والآتي إلى سانتا كروز من جامعة هارفارد. وكان بكراً لعائلة من ستة أولاد يتحدرون من أب طبيب وأم ممرضة. وفي العام ١٩٧٧، شارف عيد ميلاده الحادي والثلاثين، مما جعله أكبر الخريجين سناً.

لم تكن دراسته الجامعية منتظمة. فقد تقطّعت مراراً لأسباب مثل الخدمة العسكرية والاضطرار للعمل وغيرها. لم تكن بواعث قدومه إلى «سانتا كروز» واضحة، حتى

بالنسبة لشو نفسه. لم ير ذلك الحرم الجامعي قبلاً، بل رأى كتيباً إعلانياً تظهر فيه المباني بين الأشجار الضاربة للحمرة، مع حديث عن الميل إلى فلسفة تعليمية جديدة.

تميّزت شخصية شو بالخجل الشديد، والميل إلى العمل الصبور والدؤوب. وتقدم لنيل إجازة الدكتوراه عن التوصيل الفائق. وبدا أنه يُعد لأطروحته إعداداً جيداً. ولم يبدِ أحد قلقه من الوقت الطويل الذي صرفه شو في العمل على كومبيوتر غير إلكتروني في أحد مباني كلية الفيزياء.

يُدرّب اختصاصيو الفيزياء عبر نظام يربط المُتدرّب مع بروفسور مشرف عليه يرعى تأهيله الأكاديمي. ويُسند أساتذة الفيزياء إلى المُتدرّبين لديهم، ممن يسعون إلى الحصول على الدكتوراه، الكثير من أعمال بحوثهم في المختبرات والحسابات المُعقّدة وغيرها من الأعمال المُضنية المتصلة ببحوث الأساتذة. وفي المقابل، ينال أولئك المُتدرّبون القليل من المال، مع بعض التعويض المعنوي عبر الإشارة إلى الجهود التي بذلوها في البحوث. ويُساعد المُشرف المُتدرّب على اختيار المسائل التي يُجدي التعمق فيها. وفي حال تعمّق العلاقة بين الأستاذ والمُتدرّب، فإنها تمتد إلى ميدان العمل حيث يُزكي البروفسور المتخرج لدى جهات العمل. وكثيراً ما يرتبط اسما الأستاذ الراعي والمُتدرّب إلى الأبد.

وتُصبح تلك الصورة أكثر تعقيداً في حال التخصص في علم...غير موجود! ففي العام ١٩٧٧، لم يتوافر رعاة للساعين إلى التخصّص في مجال نظرية الكايوس. ولم تُخصّص دروس جامعية لشرحها. وحينذاك، لم توجد مختبرات للفيزياء اللاخطيّة؛ ولا بحوث عن النُظُم المُعقّدة؛ ولا مراجع عن نظرية الفوضى؛ ولا مجلة علمية عن الكايوس.

وفي «سانتا كروز»، عمل وليام بروك بصفته اختصاصياً في علم الفلك مهتماً بشؤون النظرية النسبية. وعُرف بصداقته مع إدوارد سبيغل، الاختصاصيّ في الفيزياء الفلكية. وفي الواحدة بعد منتصف الليل، صادف بروك صديقه سبيغل في أروقة فندق بوسطن، الذي استضافهما إبان حضورهما مؤتمراً علمياً عن النسبية العامة. وأخبر سبيغل بروك أنه

سمع لتوه عن نظرية لورنز وموضوعها «الجاذب الغريب». واتجه الرجلان إلى بار الفندق لمتابعة الكلام عن تلك النظرية. سبق لسبيغل أن تعرف إلى لورنز شخصياً، وقد عرف عن نظرية الكايوس منذ ستينات القرن العشرين.

ومنذ ذاك، حرص على متابعة المعلومات، مهما ضؤلت، عن الاضطراب في حركة النجوم؛ كما احتفظ بعلاقات فاعلة مع الاختصاصيين الفرنسيين في الرياضيات. وكأُستاذ في جامعة كولومبيا، ركّز بحوثه حول الاضطراب في الفضاء مسمّياً إياه «اضطراب الإيقاع الكوني».

وفي المؤتمر الذي تابعه في فندق بوسطن، نجح في إثارة اهتمام زملائه بأفكاره الجديدة. ومع تقدّم الليل، استطاع أيضاً أن يأسر انتباه صديقه بروك بأفكار مُشابهة. ولم يكن مُحدثه خالي الذهن عن موضوع الحديث الشائق. فقد اهتم بروك بالأفكار غير المألوفة. وقد اشتهر بالعمل على أحد أكثر المفاهيم إثارة للجدال في نظرية آينشتاين: قدرة الجاذبية في التأثير على النسيج المؤلّف من المكان والزمان (الزمكان). لقد شكّل ذلك المفهوم مُعضلة في الفيزياء اللاخطيّة؛ إضافة إلى كونه موضوعاً نظرياً شائكاً وعلى درجة عالية من التجريد. وفي المقابل، اهتم بروك بالمسائل العملانية البسيطة في الفيزياء.

ونشر بحثاً في علم الضوء عن العدسات المُقرّبة تتناول السماكة القصوى التي يمكن بلوغها في تلك العدسات مع المُحافظة على مظهرها وعملها. واعتبرها إسهاماً في الفيزياء المتصلة بشؤون الحياة اليومية. وفي العام ١٩٧٦، اطلع على المقال الذي نشره عالم الرياضيات روبرت ماي في مجلة «نايتشر» عن أهمية «مُعادلة الفرق اللوجستي» باعتبارها من الأشكال البسيطة للمُعادلات اللاخطيّة. وخصّص وقتاً لتعلّم تلك المُعادلة والعمل عليها، بحسب ما نصح به ماي في ذلك المقال الشهير. ولذا، لم يكن موضوع «الجاذب الغريب»، الذي ابتكره إدوارد لورنز، غريباً عن ذهنه. وأصاخ السمع لحديث صديقه سبيغل عنه. وتحركت لديه الرغبة في صنع نموذج منه. وعندما عاد إلى «سانتا

كروز»، بادر إلى تكليف روبرت شو قسماً من بحث نظري عن الصفات الرياضية للمجموعة المؤلفة من ثلاث مُعادلات لاخطيّة. وطلب يورك من شو إيجاد طريقة لإدخال تلك المجموعة إلى نظام عمل الكومبيوتر التقليدي.

وفي تاريخ تطوّر الحواسيب، مثّل الكومبيوتر غير الإلكتروني حليفاً مُربكاً. فلم تهتم به أقسام ألفيزياء. ولعبت المصادفة دوراً كبيراً في وجود حاسوب غير إلكتروني في «سانتا كروز». فقد قضى مُخططها أن تضم كلية هندسة. ثم غيّر القيّمون رأيهم، فألغوا ذلك المخطط؛ لكن الشركة التي تولّت التنفيذ اشترت بعض تجهيزات تلك الكُليّة، وضمنها الكومبيوتر غير الإلكتروني، قبل قرار الإلغاء. وفي المقابل، يُصنع الكومبيوتر الإلكتروني على أساس أن يعمل بنظام «صفر وواحد»، أي الدقة الحاسمة؛ فإما العمل الكامل أو التوقف التام. وكذلك تفرض تلك الهندسة أن العمل الذي يُنجز لمرة واحدة على الكومبيوتر، يمكن أن يُعاد ويُستعاد مراراً وتكراراً، في الخطوات نفسها والنتائج عينها. بل يمكن تكرار العمل عينه، وبتلك الدقة الصارمة، في أي كومبيوتر إلكتروني آخر. ولذا تجاوبت الحواسيب الإلكترونية بقوة مع الميل إلى التصغير والتسريع اللذين شكّلا العمود الفقري في صناعة الكومبيوتر وثورتها. فيما تميل هندسة الحاسوب غير الإلكتروني إلى دقّة أقل، مما جعلها أكثر ميلاً إلى التشوّش.

واستند عملها على الأنابيب المُفرغة ومُنظّمات مقاومة التيار الكهربائي ومُوسّعات الطاقة وغيرها من التراكيب التي ملأت أجهزة الراديو القديمة التي سبقت اختراع الترانزستور، والتي تُسمى علمياً مرحلة ما قبل الحال الصلبة. وهكذا، عمل شو على كومبيوتر غير إلكتروني اسمه «سيسترون دونر»، وهو آلة ثقيلة الوزن، تُصدر الكثير من الضوضاء والغبار أثناء عملها، وتتضمن واجهتها صفوفاً من الثقوب المُعدّة للتوصيل مع الأسلاك الكهربائية، كحال الآلات القديمة لتحويل المُكالمات الهاتفية.

ولذا، فإن برمجة الكومبيوتر غير الإلكتروني تتضمن اختيار قطع كهربائية، وتوصيلها بطريقة معينة في تلك الثقوب.

ويلجأ المُبَرمج إلى بناء تركيبات عدّة من التوصيلات الكهربائية، لكي يصطنع نوعاً من المماثلة بين عمل الكومبيوتر ونُظُم من المُعادلات الرياضية، بما يُفضي لإعطاء ذلك الكومبيوتر القدرة على العمل على المسائل الهندسية. لنفترض أنك بصدد برمجة كومبيوتر غير إلكتروني ليماثل نظام التعليق في السيارة، بما يتضمنه من كُتَل وزُنبركات ومُمْتصات الصدمة وغيرها، من أجل التوصّل إلى أسلس قيادة ممكنة. يمكن ترتيب آلات التذبذب بحيث تُماثل التذبذب في النظام الفيزيائي فعلياً. وبذا، يأخذ موسّع الدارات الكهربائية دور الزُّنبرك، والمؤشرات دور الكتل وهكذا دواليك. ولذا، فإن الحسابات لا تكون دقيقة أبداً. وبدل التمثيل الرقمي في الكومبيوتر الإلكتروني، تظهر كتلة من الأسلاك والموصلات، التي يستطيع المبرمج تعديلها بسهولة. فعندما تدار الأزرار الكهربائية الكبيرة، يُعدل عمل القطع الكهربائية التي تُمثّل المتغيّرات الفيزيائية مثل قوة الأسلاك والاحتكاك وغيرهما. ويمكن رؤية النتيجة خلال تطوّرها تدريجاً، وبصورة مُباشرة، كما يتولى جهاز الذبذبات رسمها على الشاشة.

وبالعودة إلى مختبر التوصيل الفائق، نجد شو مُنكبّاً على العمل لكي يُنهي أطروحته في الدكتوراه. وتدريجاً، دأب على قضاء وقت أطول «اللعب» مع الكومبيوتر «سيسترون دونر». وتعمّق في عمله بحيث استطاع رسم صور إلكترونية لفضاء الحال المُتصل بالمدارات الدورية والدورات المحدودة. وحينها، لو عثر شو مصادفة على صور الكايوس ومُعادلاته، مثل الجواذب الغريبة، لما استطاع التعرّف إليه. وبالنسبة إليه، لم تكن مُعادلات لورنز عن الجواذب، التي وصلت إليه عبر بعض الأوراق العلمية، أقل تعقيداً من النُّظُم التي انكب على محاولة إيجاد حلولها باستعمال الكومبيوتر غير الإلكتروني. وعمل ساعات طويلة لتركيب الأسلاك والتوصيلات والأزرار في شكل يناسب المسائل التي يعمل عليها، وخصوصاً التوصيل الفائق. وسرعان ما أدرك أنه لن يتوصل أبداً إلى الحل المنشود.

ثم صرف ليالي كثيرة في مراقبة نطنطة تلك النقطة الخضراء على شاشة جهاز رسم

الذبذبات. والحق أن تلك النطنطة رسمت مراراً وتكراراً صورة جناح الفراشة التي تدلّ على «جاذب لورنز». وأخذ الشكل الغريب الذي رسمته النقطة الخضراء يتكرر في الذاكرة البصرية لشو. وبدا وكأن للشكل حياة خاصة به. وفكّر فيه شو باعتباره شكلاً يُشبه ألسنة اللهب المتراقصة، إذ يرسم أشكالاً لا تتكرر البتة. لقد خدمت عدم دقة الكومبيوُتر غير الإلكتروني شو، لأن هذا الشكل التكراري الغريب، دفعه بسرعة لملاحظة ظاهرة الاعتماد الحسّاس على المعطيات الأولية. وبذا، وجد نفسه مدفوعاً للتفكير بمقولة إدوارد لورنز عن عبثية التنبؤ بالطقس على المدى الطويل.

وقد قفزت فكرة الاعتماد الحسّاس على الأوضاع الأولية إلى ذهن شو بسبب عمله على ذلك الكومبيوتر غير الإلكتروني. فكلما غيّر في تركيب الأسلاك، اختفى الجاذب الغريب بالنسبة للأشكال التي تظهر على شاشة جهاز رسم الذبذبات. وعندما يُعيد تركيب الأوضاع الأولية، مع وجود بعض الاختلاف الناجم من غياب الدقة الصارمة عن عمل حاسوبه، فإنه يحصل على مدارات تختلف عما أُنتج سابقاً، لكنها سرعان ما تعاود رسم الجاذب الغريب نفسه.

ومنذ طفولته، حلم شو بالعلم كشيء مُذهل وكمغامرة تكشف المجهول. وأخذ عمله الأكاديمي يبيّن له خطأ ذلك الحلم. وأعاد إليه اشتغاله على المُعادلات اللاخطية إلى العودة لحلمه الرومانسي عن الحلم باعتباره خوضاً في آفاق المجهول.

لقد عمل طويلاً في علم الموصلات الفائقة، التي تمتلئ بنظريات فيزياء الحال الباردة والقوى المغناطيسية القوية. ومنذ دخل الكومبيوتر غير الإلكتروني إلى مختبره، اختفت اختبارات التوصيل الفائق وأدواته، بلا رجعة.

وبعد أن استطاع شو اصطناع تركيب في حاسوبه البدائي عن «جاذب لورنز» الغريب، زاره عدد من العلماء للتعرّف إليه. ويصف اختصاصي الرياضيات رالف أبراهام انطباعاته عن كومبيوتر شو: «بمجرد أن تضع يديك على تلك الأزرار الكبيرة وتُديرها، تُحس بأنك تستكشف عالماً مجهولاً». عمل أبراهام مع ستيفن سمييل عندما

كان الأخير في ذروة مجده في جامعة بيركلي. لذا، كان أبراهام أحد علماء «سانتا كروز» القليلين الذين امتلكوا خلفية علمية كافية لفهم اللعبة التي صنعها شو على الحاسوب. وتمثّل رد فعله الأول بالدهشة حيال السرعة التي يظهرها ذلك الكومبيوتر البدائي في صنع «جاذب لورنز». وقد صرّح شو بأنه استعمل موسّعات طاقة لكي يحتفظ بتلك السرعة. كما تميّز الجاذب بالمتانة أيضاً.

وأثبتت عدم دقة حاسوب شو البدائي (بمعنى أن تحريك الأزرار الكبيرة لا يوصلها دوماً إلى النقطة عينها بل يقود إلى نقطة شديدة القرب منها)؛ أن غياب الدقة الصارمة لا يُبدّد جاذب لورنز، بل يعيد رسمه بطريقة مختلفة اختلافاً هيناً جداً عما كانه. بل سرعان ما اتّضح أن لذلك الاختلاف أنماطاً يتبعها، فلا يسير سيراً متخبّطاً. وبحسب تعبير أبراهام: «تعطي تجربة شو النموذج عن قدرة الاختبارات الصغيرة على كشف الأسرار الكبيرة... لقد صنع شيئاً يمكّن من اختبار مفاهيم أساسية مثل «مُعامِل لايبونوف» والأبعاد الفراكتالية، وكلاهما متوافر في القوى الطبيعية».

هل يُشكّل حاسوب شو البدائي وتجربته علماً؟ المؤكد أنه لم يكن جزءاً من الرياضيات، ولم يتضمن مُعادلات ولا براهين؛ ولا يغير إعجاب بعض علماء الرياضيات مع تلك التجربة من هذا الواقع. كما لم تعتبره كلية الفيزياء علماً أيضاً. وأيّاً كان شأنه، فقد نجح شو وكومبيوتره البدائي في استرعاء اهتمام المجتمع العلمي.

اعتاد شو أن يترك بابه مفتوحاً، وصودف أن مدخل كلية الفيزياء قريب منه. ولأن جمهور تجربته نما باطراد، سرعان ما وجد شو لنفسه رفاقاً. سمّت تلك المجموعة نفسها «جماعة النُّظُم الديناميكية». وسمّاها آخرون «قبيلة الكايوس». واتخذت من مختبر شو مقراً هادئاً لها. وفيما عانى شو من عدم قدرته على تسويق أفكاره علمياً، فإن الرفاق الجُدد لم يشكوا تلك المسألة. وراقتهم كثيراً فكرة شو عن صنع برنامج غير مخطط لاكتشاف علم غير معروف!

برز دويني فارمر، التكساسي الطويل القامة، كمتحدث طلِق اللسان عن تلك الجماعة.

وفي العام ١٩٧٧، بدا فارمر، بأعوامه الأربعة والعشرين وطاقته الفائضة، كآلة مُفكّرة. ويُعطي انطباعاً أولياً عن شخص فائق الحماسة. وضمّت الجماعة أيضاً نورمان باكارد الذي يصغر فارمر بثلاث سنوات، المولود في مدينة سيلفر سيتي بولاية نيومكسيكو.

وقد وصل «سانتا كروز» في خريف العام ١٩٧٧، في الوقت الذي بدأ فارمر في العمل على تطبيقِ قوانين الحركة على لعبة الروليت. وقدّر فارمر أنه سيحتاج سنة كاملة لإتمام تلك الدراسة. كم كان مخطئاً! فقد سار وراء خيال الروليت مدّة عشر سنوات، بمؤازرة اختصاصيين في علم الفيزياء ومتطوعين من المقامرين المحترفين، ولم يُدرك ذلك الحلم. وظل الحلم يُخايله لاحقاً عندما انضم إلى «قسم الدراسات النظرية» في مختبر «لوس آلموس». لقد احتسبت مسارات الكرة وقفزاتها. وكُتبت بشأنها برمجيات للكومبيوتر، ثم أُعيدت كتابتها مراراً. وزار فارمر وجماعته كازينوهات القمار، بعد أن أخفوا كومبيوترات صغيرة في ثيابهم بحذق. ولم تُفضِ تلك الجهود إلى نتيجة ملموسة. وفي غير مرة، انغمست «جماعة النُّظُم الديناميكية» كلها في بحوث الروليت. وفي المقابل، أعطت بحوث الروليت لهذه الجماعة مقدرات ضخمة على التحليل السريع للنُّظُم الديناميكية. ولكن ذلك أيضاً لم يدفع علماء الفيزياء في «سانتا كروز» لأخذ بحوث الروليت بجديّة.

يُنظر إلى جايمس كراتشفيلد باعتباره العضو الرابع في تلك الجماعة، وهو أصغر أعضائها سناً، وهو أيضاً الوحيد الذي جاء من كاليفورنيا. وتميز ببنيته المتينة والميّالة للقصر والامتلاء. وقد مارس التزلج على الماء بانتظام. وبرع في علوم الكومبيوتر. وقد التحق بـ«سانتا كروز» قبل تخرجه. ثم عمل فيها مُساعداً في مختبر شو، إبان عمل الأخير على تجارب التوصيل الفائق. وأمضى سنة متنقلاً بين عمله في «سانتا كروز» ووظيفة في مختبر شركة «أي بي أم» للكومبيوتر في «سان جوزيه» المُجاورة.

ولم يلتحق فعلياً بقسم الفيزياء، بعد التخرّج، إلا في العام ١٩٨٠. وحينذاك، أمضى سنتين عاملاً في مختبر شو، فيما تابع دراساته المُعمّقة في الرياضيات باعتبارها شيئاً

أساسياً لفهم النُّظُم الديناميكية. وكبقية أفراد الجماعة، لم يلتزم كراتشفيلد القواعد الصارمة التي سادت كلية الفيزياء في «سانتا كروز».

في ربيع العام ١٩٧٨، لم تعلم تلك الكلية أن شو أوشك أن يهجر تجاربه عن التوصيل الفائق. وكان قاب قوسين أو أدنى من إنهاء أطروحته عنها. وأصرت الكلية على وجوب احترامْ التسلسل الأكاديمي، بحيث توجب على شو، وبغض النظر عن أي شيء آخر، أن يُنهي أطروحة الدكتوراه أولاً، ثم ينطلق في تجاربه الخاصة. وحينذاك، نظرت الأوساط الأكاديمية في «سانتا كروز» إلى نظرية الكايوس بارتياب كبير. لم يكن أحد من الأساتذة أهلاً لدراسة علم لم تتبلور أُطُره العلمية، بل لا يوجد له اسم ولا مرجعيات ولا أدبيات. ولم يحز أحد سابقاً درجة دكتوراه عن نظرية الفوضى. ولم تتوافر فُرص عمل واضحة للمتخصصين المحتملين في الكايوس. وبدا صعباً العثور على التمويل المناسب لبحوثها. فتقليدياً، تُموَّل الأبحاث في كلية الفيزياء في «سانتا كروز»، كما في كل الجامعات الأميركية، من «المؤسسة الوطنية (الأميركية) للعلوم» ومن وكالات حكومية أُخرى، عبر صناديق لدعم البحث العلمي. وتأتي أموال ضخمة لبحوث الفيزياء من قوات البحرية والطيران ووزارة الطاقة و«وكالة الاستخبارات المركزية» (سي آي أيه)، من دون أن تشترط تلك الهيئات أن تؤثر البحوث مباشرة في مجالات ميكانيكا الهيدروليك، ديناميكا الهواء، الطاقة والاستخبارات. وبذا، يحصل اختصاصيو الفيزياء على أموال كبيرة لشراء المُعدات ودفع رواتب مساعديهم من الخريجين. ويدفع لهؤلاء أيضاً تكاليف مستلزماتهم المكتبية، وبدل سفرهم لحضور المؤتمرات، وحتى مصاريف عطلهم الصيفية. ولولا ذلك النظام، لظل المتدربون عاجزين مادياً. وفي المقابل، حُرمت «جماعة النُّظُم الديناميكية» من تمويل هذا النظام، بسبب مواقف الأوساط الأكاديمية من بحوثها. وبذا، نجم وضع مُعقّد. وصار مألوفاً البحث عن الأدوات والأجهزة التي تُفقد ليلاً، في مختبر شو. وبين الفينة والأُخرى، يتمكن عضو من تلك الجماعة من اقتناص بضع مئات من الدولارات من روابط الطلبة المتخرجين، أو تجد كلية الفيزياء مناسبة

لإمدادهم ببعض المال. وشرعت بعض المعدات الإلكترونية في التجمع في مختبر شو.

وضَلَّ كومبيوتر إلكتروني صغير، حصلت عليه مجموعة متخصِّصة في فيزياء الجُسيمات، طريقه إلى مخزن المُعدات شبه التالفة، ليصل إلى مختبر شو.

وبات فارمر اختصاصياً في إطالة عمر ذلك الكومبيوتر. وذات صيف، دُعي إلى «المركز الوطني (الأميركي) لبحوث الغلاف الجوي» في بولدر بولاية كولورادو. وهناك، عاين الكومبيوترات الضخمة أثناء عملها على مهمات مثل صنع نموذج شامل عن الطقس. ولمس قدرتها على اقتصاد الوقت المهدور. واستفادت المجموعة من ميول أفرادها «اللعبية» تجاه الإلكترونيات. فقد صرف شو معظم مراهقته في ملاحقة الأدوات الذكية. وعمل باكارد صبياً في إصلاح الأجهزة التلفزيونية. وانتمى كراتشفيلد إلى الجيل الرياضي الأول الذي يستخدم اللغة المنطقية لبرمجيات الكومبيوتر بصورة تلقائية. وفي «سانتا كروز»، شيدت مباني الفيزياء، التي انتشرت بين الأشجار الحمر، بطريقة تشبه الكليات المماثلة في الجامعات الأميركية. ولكن الغرفة التي حلّت فيها جماعة النُّظُم الديناميكية سادها جو خاص.

فتكوَّمت فيها أكداس الأوراق. وغطّت جدرانها صور المجموعات الإثنية من سكان جُزر تاهيتي ممتزجة بصور الكومبيوتر عن الجاذب الغريب. وربما في أي وقت، ولكن غالباً في الليل، يُشاهد أحد أعضاء تلك الجماعة منهمكاً في إعادة صوغ التركيب الهندسي للحاسوب، أو منغمساً في نقاش عن اللاوعي وتطوّر الأنواع، أو مُعدلاً في عمل جهاز رسم الذبذبات، أو مأخوذاً بالتحديق في نطنطة النقطة الخضراء على شاشة ذلك الجهاز كأنه يُشاهد جسداً حيّاً.

ولاحقاً، وصف فارمر تلك الأوقات بقوله: «لقد انجذبنا حقاً إلى الشيء عينه: إن الحتمية موجودة لكن ليس فعلياً! لقد فكرنا في أن تلك النُّظُم الحتمية التي درسناها، تتحوّل إلى الفوضى. وبدت تلك الفكرة مثيرة حقاً. وانجذبنا إلى محاولة فهم الآلية التي تُحوّل النظام إلى فوضى... يصعب تقدير أهمية تلك الرؤى، إذا لم تكن قد انغمست

لسنوات طويلة في علوم الفيزياء التقليدية. وفيها، تتكرّر على رأسك فكرة أن النُّظُم التقليدية حيث كل شيء يعتمد على الأوضاع الأولية؛ ثم تأتي نماذج الفيزياء الكمومية بحتمياتها القوية، مع التشديد على أهمية العمل على جمع المُعطيات عن الأوضاع الأولية. وفي إطار الفيزياء التقليدية أيضاً، لا تعثر على كلمة لاخطيّ سوى مرات قليلة. كما يُعطى طالب الفيزياء دروساً في الرياضيات، فيكون الفصل الأخير من المنهج عن المُعادلات اللاخطيّة، فيستنتج أن في مقدوره تجاهل هذه المُعادلات، وكذلك أن يُقلّصها إلى مُعادلات خطيّة تقريبية لا تقود إلا إلى حلول تقريبية مما يولّد نوعاً من الإحباط حيال الرياضيات اللاخطيّة.

ويتابع: «لم يتوافر لدى جماعة النُّظُم الديناميكية مفهوم «الفرق الفعلي» الذي تُدخله القوى اللاخطيّة على النماذج. ولذا، بدا مثيراً القول إن المُعادلة قد تتخبط فجأة بطريقة عشوائية. ويدفعك الأمر للسؤال فوراً عن مصدر ذلك التخبّط في الحركة، لأنه لا يظهر في المُعادلات. يشبه ذلك القول بحدوث شيء ما من غير سبب، أو انبثاق شيء من لا شيء».

ووصف كراتشفيلد الأمر عينه بالقول: «لقد أدركنا أن تجارب الفيزياء بأكملها لا تلائم الإطار الذي نفكر فيه. فلماذا؟ لقد بحثنا عن الإجابة في العالم الفعلي، الذي صار أخّاذاً. وقد فهمنا شيئاً ما». عملت «جماعة النُّظُم الديناميكية» على تعزيز ثقتها بنفسها، وازدرت الأساتذة التقليديين الذين عجزوا عن الإجابة عن أسئلتها عن ماهية الحتمية، وطبيعة الذكاء، والاتجاه الذي تسلكه البيولوجيا التطورية. ووصف باكارد ذلك الوضع بالقول: «إن ما جمعنا معاً هو رؤية بعيدة المدى... لقد صُدمنا بهشاشة النُّظُم التي يعتمدها علم الفيزياء تقليدياً، والتي قتلها بحثاً وتمحيصاً. يكفي أن تخرج خطوة صغيرة من ذلك النظام؛ كأن تسير بمُتغيّر ما خطوة مختلفة، لكي تصل إلى وضع لا تستطيع كل تلك المعرفة المتراكمة أن تُفسّره... لقد كان من المستطاع اكتشاف ظاهرة الكايوس منذ زمن طويل. ولم يحدث ذلك لأن هذا الجسم الهائل من الأعمال النظرية وتجاربها ركّز

على الحركة المنتظمة. ولكن يكفي أن تنظر إلى خارج ذلك الجسد، لتجد مفهوم الكايوس، الذي يجدّد الثقة بأن عالم الفيزياء عليه أن يترك نفسه لملاحظاته وأن يُنشئ إطاراً نظرياً حولها... رأينا أن، على المدى البعيد، يصلح تقصي الديناميكيات المُعقّدة مدخلاً قد يقود إلى فهم أشد النُّظُم تعقيداً». ويقول فارمر: «على المستوى الفلسفي، فهمت الكايوس باعتباره طريقاً عملياً لوصف الإرادة الحُرّة، وبما يُساعد على المواءمة بين الإرادة الحُرّة والحتمية. إن النظام حتمي، لكنك لا تستطيع التنبؤ بما قد يحصل تالياً. وفي الوقت عينه، لطالما أحسست بأن المسائل الأساسية في العالم تتصل دوماً بفهم الماهية الفعلية للنظام، سواء في الحياة أو في الذكاء. لكن، كيف يمكن دراسة هذه المواضيع؟ ولاح لي أن ما يفعله علماء البيولوجيا تطبيقي ومُحدّد، وذلك ما لا يفعله علماء الكيمياء ولا الرياضيات ولا الفيزياء. أحسست دوماً بأن الانبثاق التلقائي للتنظيم الذاتي يجب أن يُنظر إليه كجزء من الفيزياء... يُشبه الأمر قطعة نقود معدنية. على أحد وجهيها، النظام الذي يتضمن أن تنبثق منه الفوضى. وفي الوجه الآخر، الفوضى التي تُخبئ النظام في طيّاتها».

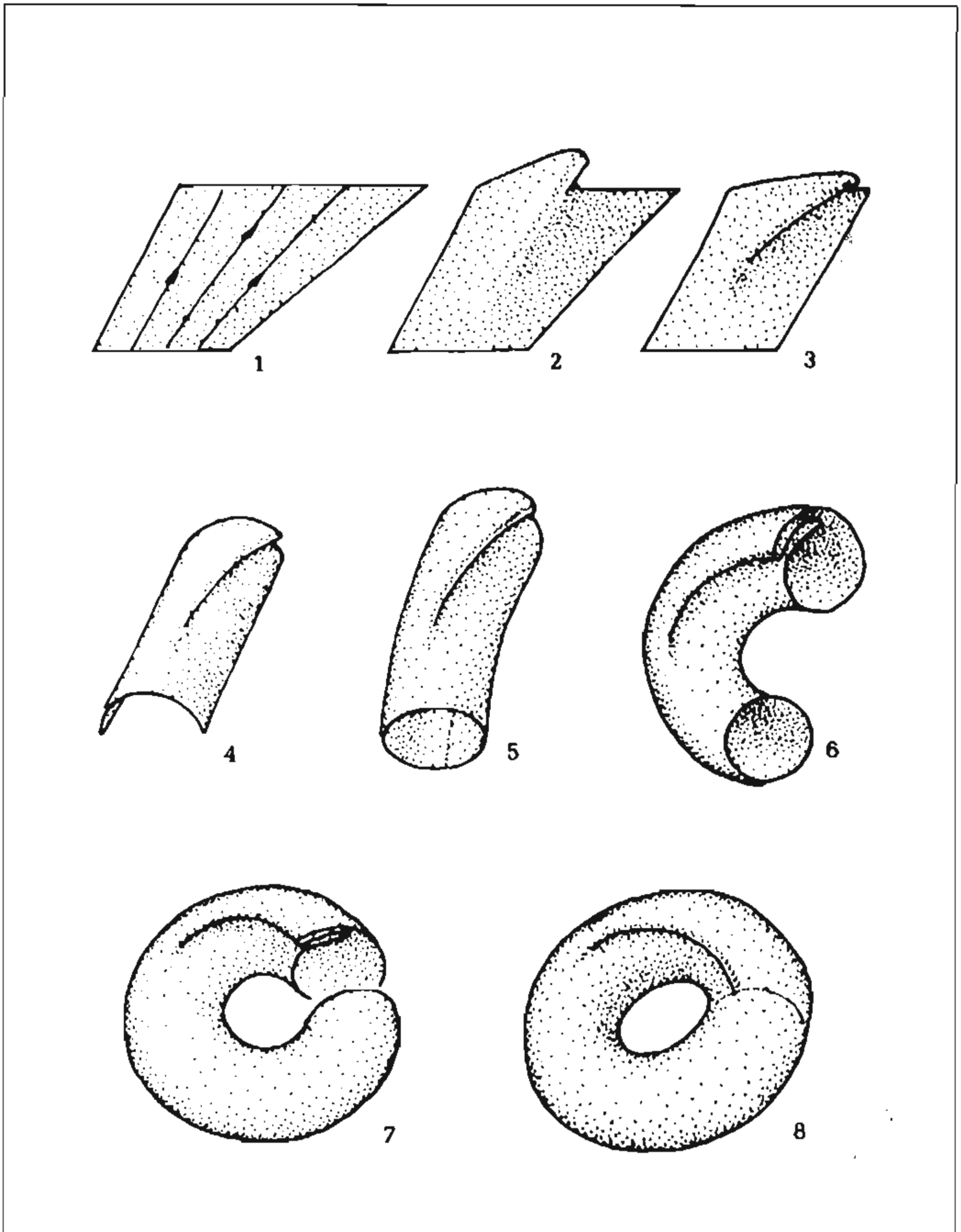
عمل شو ورفاقه على تحويل شغفهم إلى برنامج علمي. ووجب عليهم طرح أسئلة جديرة بالنقاش ويمكن العثور على إجاباتها. فكَّروا في الطُّرُق التي تربط بين النظرية والتطبيق، لأنهم أحسوا بوجود فراغ بينهما. وقبل انطلاقهم في العمل، وجب عليهم أن يحيطوا بما يعرفه العلم وما لا يعرفه، وهو تحدٍ شاق وعسير. وانتصبت في وجههم عقبة تتمثّل في ميل التواصل العلمي أن يكون جزئياً، خصوصاً عندما يتعلق الأمر بموضوع «يعبر» أكثر من حقل تخصص علمي. ولم يستطيعوا الجزم دوماً متى تصل أقدامهم إلى الجديد، الذي يتعيّن استكشافه، ومتى تبقى في القديم المعلوم. وتجسّد أحد الأدوية لداء «جهلهم» هذا في جوزيف فورد، أحد مناصري نظرية الفوضى في «معهد جورجيا للتقنية». اقتنع فورد بأن المُعادلات اللاخطيّة هي مستقبل علم الفيزياء بقضه وقضيضه. وكرّس نفسه لمسح المعلومات المتوافرة عنها في المجلات العلمية.

وعُرف كاختصاصي في الفوضى غير القابلة للتبدّد، كما يكونه الكايوس في النُظُم الفلكية وفيزياء الجُسيمات.

وامتلك معرفة لصيقة واستثنائية في منجزات العلماء السوفيات، لأنه حرص على الاتصال بكل عالم يشاركه في أفكاره عن الكايوس، ولو من طرف بعيد. وكلما نُشر مقال في العلوم اللاخطيّة وجد فورد طريقة للتواصل معه، ووضعه في قائمة مُلخّصاته عن المُعادلات اللاخطيّة. وفي «سانتا كروز»، شاع أمر قائمة فورد تلك، واهتم الطلبة بالحصول على نسخ من تلك المُلخّصات. وفي فترة وجيزة، شاعت تلك النُسخ في «سانتا كروز».

وأدركت «جماعة النُظُم الميكانيكية» أن الجواذب الغريبة تحتاج إلى استقصاء مُدقّق. فما هي الأشكال المميزة لتلك الجواذب؟ ما الذي يقترحه علم الهندسة بالنسبة إلى نوع الفيزياء المُناسبة لتلك الجواذب؟ وما هي هندستها اللاخطّية (طوبولوجيا)؟ لقد شكّلت تجارب شو نوعاً من المقاربة الأولية لتلك الأسئلة.

وتعاملت الهندسة تقليدياً بصورة مباشرة مع مسألة البنية، لكن شو اعتبر تلك المقتربات مُغرقة في التفاصيل، بمعنى أنها تُظهر الكثير من الأشجار لكنها لا ترى الغابة! وخلال مطالعته المراجع العلمية، أحسّ بأن علماء الرياضيات، ولأنهم حرموا أنفسهم من الحصول على أدوات جديدة في التعامل مع الأعداد، باتوا مشدودين إلى أنواع خاصة من التعقيد في بُنى المدارات، وإلى تحرّي الأشياء النهائية ومشكلات الانقطاع وغيرها. ولم يهتم علماء الرياضيات كثيراً بالتقريبية التي يتضمنها عمل الكومبيوتر غير الإلكتروني، والتي تظهر عند استخدامه للإجابة عن أسئلة أساسية في الفيزياء، مع العلم بأن التقريبية تملأ النُظُم فعلياً في العالم. ورأى شو إلى ما يُظهره جهاز رسم الذبذبات ليس باعتباره تجمعاً من مدارات منفردة، بل باعتباره غلافاً يشتمل على تلك المدارات كلها. ولاحظ أن الغلاف يتغير كلما حرّكت يداه أزرار الكومبيوتر البدائي. ولم يستطع إعطاء تفسير متين



تثني فضاء الحال: إن إعادة تشكيل فضاء الحال تصنع جاذباً يشبه الكعكة الأميركية المُحلاة لكنها تُلَفُّ على نفسها، فتُعرف باسم «كعكة بيركهوف».

للتقلّبات في الرياضيات المُتصلة بالهندسة اللاكميّة. ولكنه أحسّ بأنه بدأ يفهمها. يرغب الفيزيائي دوماً في إجراء القياسات.

فما الذي يمكن قياسه في تلك الصور المتهاربة على شاشة جهاز رسم الذبذبات؟ حاول شو ورفاقه فصل صفات مُعينة للتعرف على الجاذب الغريب. وبرزت مسألة الاعتماد الحسّاس على الأوضاع الأولية التي تجعل المدارات المتقاربة متنافرة بعضها من بعض. وقد جعلت تلك الصفة عينها لورنز يُدرك أن التنبؤ الحتمي الطويل الأجل هو أمر مستحيل. ولكن، كيف يمكن قياس هذا المستحيل وإظهاره؟ كيف يمكن اللاتوقّع أن يصُبّ في قوالب كميّة؟

تكمن الإجابة عن تلك الأسئلة في مفهوم ضمن الرياضيات الروسية: مُعامِل لايبونوف. ويُعطي هذا الرقم قياساً عن الصفات الطوبولوجية المتصلة بمفاهيم مثل اللاتوقّع. ويؤدي إدخال مُعامِل لايبونوف إلى النظام للحصول على قياس للآثار المتضاربة التي يولدها الجاذب على فضاء الحال، مما يقود إلى مَطّه وتقلصه وتثنّيه. وبالاختصار، يعطي المُعامِل قياساً على كل الصفات المتصلة بثبات النظام واضطرابه.

وعندما تصعد قيمة المُعامِل إلى فوق الصفر، تكون النتيجة تمدداً ومطّاً، لأن النقاط القريبة تتباعد. وعندما تنخفض قيمته إلى دون الصفر، يحدث التقلّص. وبالنسبة للجاذب الثابت في نقطة مُعيّنة، تُصبح قيم مُعامِل لايبونوف سلبية، لأن اتجاه الجذب يسير إلى الداخل منجذباً إلى حال نهائية من الاستقرار. ويتخذ الجاذب شكل مدار دوري إذا امتلك مُعاملاً قيمته صفر فيما باقي مُعاملاته دون الصفر. ولكي يُصبح الجاذب غريباً، من النوع الذي رصده إدوارد لورنز، يتوجب أن يمتلك مُعاملاً وحيداً على الأقل بقيمة إيجابية.

وعلى الرغم من شغفها بالجواذب، لم تبتكر «جماعة النُظُم الديناميكية» تلك الفكرة، لكنهم التقطوها وسعوا إلى تطويرها، وصبّها في أشد الصيغ عملانية.

وبرعوا في قياس مُعامِلات لايبونوف ورصد علاقاتها مع الصفات المهمة الأخرى في النُظُم الديناميكية. واستعملوا وسائل الرسوم المتحركة في الكومبيوتر لصنع أفلام

تعرض مفهوم التمازج بين الانتظام والفوضى في النُّظُم الديناميكية. وأظهرت تحليلاتهم النابضة بالحياة أن بعض النُّظُم يمكنها خلق فوضى في اتجاه مُعيّن، والبقاء على رهافة وانتظام منهجين في الاتجاه الآخر. وأظهر أحد الأفلام ما الذي يحصل داخل تجمع صغير من نقاط متقاربة تُمثّل الأوضاع الأولية، في جاذب غريب؛ نتيجة التطوّر زمنياً في النظام الديناميكي. ولقد شرعت تلك النقاط في الانتشار، وفقدت تمركزها. وتتناثر كالغبار. ثم تتحوّل إلى لطخة شديدة الضآلة. وفي بعض الجواذب، تنتشر اللطخة لتملأ الجاذب. وتبرع تلك الجواذب في عملية المزج. وفي أنواع أُخرى من الجواذب، تنتشر اللطخة في بعض الاتجاهات، ثم تصبح حزمة بحيث تسود الفوضى في أحد محاورها، ويسود الانتظام في محور آخر؛ فكأن النظام يمتلك نوازع فوضوية وتنظيمية في الوقت عينه، ولكنها منفصلة أيضاً. وفيما تقود أحد النوازع إلى العشوائي اللامتوقع، تحرص الأخرى على البقاء في انتظام دقيق. ومن المستطاع تحديد النازعين كليهما وقياسهما كمياً.

لعل أكثر البصمات تميّزاً التي تركتها «سانتا كروز» على نظرية الكايوس هي تلك المتصلة بنظرية شبه فلسفية غائمة تُسمى «نظرية المعلومات»، وقد اخترعها باحث في شركة «مختبرات بيل للتليفون» في أواخر أربعينات القرن العشرين، اسمه كلود شانون. وحينذاك، أطلق شانون على عمله اسم «النظرية الرياضية للتواصل»، ولكنها تحدثت عن المعلومة باعتبارها كميّة، ثم أُلصق بها اسم «نظرية المعلومات». وتُعتبر نتاجاً للعصر الإلكتروني. فقد حملت خطوط الهاتف وموجات الراديو شيئاً مُعيّناً، ثم شرعت الكومبيوترات في تخزينه في البطاقات المُثقّبة ثم في الأسطوانات المُمغنطة. ولم يكن ذلك الشيء معرفة ولا معنى. ولم تكن وحداته الأساسية أفكاراً ولا مفاهيم، ولا حتى كلمات ولا أرقاماً ولا معرفة. وتعامل المهندسون وعلماء الرياضيات مع هذا الشيء. واستطاعوا نقله وقياسه واختبار مدى الدقة في بثّه. وأثبتت المعلومة أنها كلمة جيدة لوصفه، لكن بشرط استخدامها من دون أن يُفهم منها أنها تشير إلى شيء ذي معنى أو

محتوى أو مدلول أو مفهوم أو أي شيء من هذا القبيل. لقد تحكّمت صناعة المُكوّنات الإلكترونية «الصلبة» (تُسمى «هارد وير») في تلك النظرية.

لأن المعلومات تُخزّن ضمن نظام إلكتروني من الإشارات الثنائية التي تشير إلى سريان التيار (يُرمز إليه بالعدد واحد) أو انقطاعه (يُرمز إليه بالعدد صفر). ويستعمل النظام وحدة قياس إلكترونية تُسمى «بتة». وبذا، فإن الـ«بتة» هي وحدة قياس المعلومات.

ومن الناحية التقنية، صارت نظرية المعلومات أداة لفهم ظواهر مثل أثر التشويش، باعتباره أخطاء عشوائية، على تدفق الـ«بتة». كما أعطت طريقة لقياس قدرة التحميل في الخطوط والأقراص المُدمجة أو أي وسيلة تقنية تتضمن تشفيراً للغة أو الصور أو الأصوات. واصطنعت إطاراً نظرياً لملاحظة مدى نجاعة المقتربات المختلفة في تصحيح الأخطاء في بث تيار من الـ«بتة»، وضمنها المقترب الذي يتخذ مجموعة من الـ«بتة» معياراً لقياس سريان تيار الـ«بتة». والتقطت مفهوم «الحشو»، لأنه يشير إلى ما يفيض عن الحاجة. وباستخدام مصطلحات نظرية شانون، فإن أكثر من نصف اللغة العادية هو «حشو» على هيئة أصوات وأحرف زائدة عن الحاجة إلى توصيل رسالة ما. ثمة فكرة معروفة تقول إن التواصل في عالم تؤلفه الغمغمة والأخطاء الطوبولوجية، يعتمد على الحشو. ويُعتبر الاختزال من النماذج المُعبّرة عن هذه الفكرة، وكذلك طريقة الكتابة في رسائل الخلوي النصيّة. لقد أتاحت نظرية المعلومات قياس هذه الأشياء كمياً.

من المستطاع النظر إلى نظرية المعلومات باعتبارها خروجاً متوقعاً عن الاعتباطية، إذ يرجع جزء من الحشو المنتشر في اللغة العادية إلى المعنى (أي الرسالة التي تحملها الكلمات)، وهو القسم الذي يصعب قياسه، لأنه يعتمد على المعرفة المشتركة بين الناس عن لغتهم والعالم. وبفضل هذا القسم، يستطيع الناس مثلاً، حل الكلمات المتقاطعة أو شبكة الكلمات الناقصة. إذاً، تعجز نظرية المعلومات عن قياس «المعلومات» المتضمّنة في الكلام، لكنها تستطيع قياس أشياء أُخرى. من الناحية الإحصائية، فإن احتمال أن يكون أي حرف من اللغة الإنكليزية «أي» هو واحد من ٢٦. ولا يتعيّن إحصاء الأحرف

وكأنها جُزر معزولة. فإذا علمنا أن حرفاً إنكليزياً هو «تي» يمكننا توقع الحرف الذي يليه؛ فإذا صحّ التوقع، يسهل التنبؤ بالحرف الثالث وهكذا. إن الميل الإحصائي للتوليفات من حرفين أو ثلاثة في لغة ما، يعطي مفتاحاً لرصد بعض الملامح الأساسية الخاصة بتلك اللغة. إذا بُرمج كومبيوتر مُعين لكي يراقب التتابعات المحتملة للتوليفات المُكوّنة من حرفين أوْ ثلاثة، في إمكانه أن يُنتج خليطاً مشوشاً ومتدفقاً من الكلام الذي لا معنى له، لكنه يوحي باللغة التي ينتمي إليها.

وقد استغلّ اختصاصيو الشيفرة هذه الأنماط الإحصائية في اللغة لحلّ ألغاز الشيفرات البسيطة. ويستخدمهم مهندسو الاتصالات في صنع تقنيات تتيح ضغط المعلومات وإزالة الحشو لكي يزيدوا من سعة تخزين الأقراص ومن قدرة الكابلات على النقل.

وبالنسبة لكلود شانون، من الأصح القول إن تيار المعطيات في اللغة العادية أقل من العشوائي؛ وبما أن كل «بتة» تتقيّد جزئياً بالمجموعة التي قبلها لذا فإن كل «بتة» تحمل معطيات أقل مما «تستحقه» فعلياً. وبذا، يصل الأمر إلى قول يتضمن تناقضاً واضحاً: فكلما كان تيار المُعطيات اعتباطياً أكثر، زادت قدرة الـ«بتة المفردة على نقل المعلومات.

وإضافة إلى ملاءمة تلك الفورة التي رافقت انطلاق عصر الكومبيوتر، اكتسبت «نظرية المعلومات» عند شانون، نوعاً من الرداء الفلسفي المتواضع.

كما تبيّن أن قسماً من إغراء نظرية شانون لمن هم خارج الأطر التقنية، يرجع إلى استخدامها مصطلحاً مغرياً هو «مقدار عدم الاستفادة» (الإنتروبيا). ويُسمى أيضاً «مقدار البَدَد». وتُشير الإنتروبيا إلى كمية الطاقة التي تتبدّد من دون استخدامها، فلا يُستفاد منها في نظام معين. وبكلام آخر، فإن النظام، مهما كان كفيّاً، يفقد تدريجاً قدرته على الاستفادة من طاقته القصوى، بل لا يصلها أبداً. وفي عرضه لنظرية المعلومات، يورد وارن ويفر: «إن وضع مصطلح الإنتروبيا في متن نظرية عن الاتصالات يولّد نوعاً من الإثارة لأنه يوحي بشيء خفي وغامض يُخالط تلك النظرية، وكأنه الشيء الأساسي والمهم». والمعلوم أن مصطلح الإنتروبيا جاء من علم الديناميكا الحراري، كجزء مكمل

لثاني قوانينه الذي يقول إن الكون يسير حتماً نحو المزيد من التشوّش واللاانتظام. تخيل حوض سباحة وقد قُسِّم إلى نصفين، فمُلئ أحدهما ماءً والآخر حبراً. إذا أزيل ما يفصل بينهما، يمتزج الحبر بالماء. يسير هذا التمازج في اتجاه وحيد. ولو ظل الحوض ساكناً أبد الدهر، لا ينفصل الماء عن الحبر تلقائياً.

ولهذا السبب يُقال دوماً إن القانون الثاني للديناميكيا الحرارية يمثّل شارعاً باتجاه وحيد. ولذا، تُعبّر الإنتروبيا عن خاصية تجعل النُظُم الديناميكية ميّالة للمُتمازج وغير المُنتظم والعشوائي. ويسهُل فَهم هذا البَدَد في الطاقة في شكل حدسي، ولكن يصعب قياسه. هل من المُستطاع التوصّل إلى احتساب موثوق به إلى درجة التمازج بين مادتين؟ يمكن أن نتخيل عدّاداً شديد الحساسية يُحصي عدد الجُزيئات التي تنتقل من جهة إلى أُخرى في بعض النماذج. فكيف يكون التمازج لو أن حوض السباحة الخيالي امتلأ نصفه بكلمة «نعم» ونصفه الآخر بكلمة «لا»، فصارت صيغة التمازج هي نعم-لا لا-لا نعم-لا لا-نعم؟ يظهر الانتظام أحياناً بطريقة غير متوقعة. وفي نظرية المعلومات، تُشكّل أشياء مثل المعنى والتمثيل أعباءً إضافية. لنأخذ تسلسلاً من نوع ٠١؛ ٠١٠٠ ٠١٠٠٠٠؛ ٠٠١٠ ١١١؛ ٠١٠ ١١ ٠٠؛ ٠٠٠٠؛ ٠٠١٠؛ ١١١ ٠١٠؛ ٠١٠٠ ٠٠؛ ٠٠٠ ٠٠٠٠؛ ... الخ.

ربما يبدو التسلسل منتظماً في عيون من تعوّد قراءة شيفرة مورس التي كُتبت بها رسائل التلغراف قديماً. فماذا عن الهندسة اللاخطيّة وأنماطها النافرة في «الجاذب الغريب؟» ونظر روبرت شو إلى الجواذب الغريبة باعتبارها مُحركات نظرية المعلومات. وفي رؤية أولى، طرح شو فكرة مفادها أن الطبيعة أعطت طريقاً طبيعياً لكي تستعيد الفيزياء الأفكار التي استلهمتها نظرية المعلومات من الديناميكا الحرارية، وبصورة أكثر حيوية. إذ تُقدّم الجواذب الغريبة التي يجتمع فيها الانتظام والفوضى، أسلوباً مثيراً للسؤال عن كيفية قياس مدى البَدَد (الإنتروبيا) في النظام. وإذ باستطاعتها أيضاً أن تنتج المُتمازج واللامتوقع بكفاءة. وكذلك ترفع «مقدار البَدَد» بقوة. كما تصنع في المكان الخالي، بحسب ما برهن شو عليه، فيوضاً من المعلومات.

ذات يوم، انشغل نورمان باكارد بقراءة مجلة «ساينتيفك أميركان» العلمية. ولاحظ إعلاناً عن مسابقة علمية حملت اسم «مُسابقة لويس جاكو». وراقته فكرة أن يُخصص مستثمر فرنسي جائزة مغرية عُرف بابتكاره لنظرية خاصة عن الكون والمجرّات والمجرّات داخل المجرّات. دعت المُسابقة إلى تقديم مقالات علمية عن المواضيع التي تناولتها نظرية جاكو. وعلى الرغم من أنها توسّعت في الدعوة إلى المُشاركة، فإن هيئة التحكيم فيها ضمت أسماء لامعة من المجتمع العلمي الفرنسي. ورصدت للفائز جائزة سنية. وحمل باكارد الإعلان إلى مكتب شو. وقرأ الرجلان أن الموعد النهائي لتسلم المقالات رأس السنة للعام ١٩٧٨.

وبسرعة استنفرت «جماعة النُّظُم الديناميكية» قواها. وأخذ أعضاؤها يجتمعون بانتظام في منزل قديم في «سانتا كروز»، بالقرب من الشاطئ. وحوى المنزل أثاثاً مُثقلاً بالبراغيث، إضافة إلى مُعدات الكومبيوتر وأدواته التي تراكمت من أيام مسألة الروليت.

وجلب شو بيانو متواضعاً، ليعزف عليه موسيقى ترجع إلى عصر الباروك الكلاسيكي حيناً، ومقطوعات مرتجلة تمزج بين الكلاسيكي والحديث حيناً آخر. وكوّنت الجماعة أسلوباً خاصاً للعمل، تضمن التخلّص من الأفكار القديمة بوضعها على محك العملانية، وقراءة المراجع العلمية المختلفة، وكتابة أوراق علمية بطريقة جديدة. وتدريجاً، تعلموا أن يراجعوا معاً الأوراق العلمية المنشورة صحافياً بطريقة تضمن إحاطتهم بها. وأنجز شو ورقته العلمية قبل الجميع. وعلى عادته، دأب على إعادة كتابتها، وكعادته بات متأخراً.

وفي كانون الأول (ديسمبر) من العام ١٩٧٧، غادر شو «سانتا كروز» ليُشارك في الاجتماع الأول الذي خصّصته «أكاديمية نيويورك للعلوم» لنقاش نظرية الكايوس.

ودفع أستاذه المُشرف على بحوثه عن التوصيل الفائق، تكاليف تلك الرحلة.

وصل شو ليستمع، ومن دون دعوة سابقة، إلى العلماء الذين يعرفهم عبر أعمالهم عن تلك النظرية من أمثال ديفيد ريبال وروبرت ماي وجايمس يورك. وأُعجب شو بهؤلاء

العلماء، بمقدار انبهاره ببدل إيجار الليلة (٣٥ دولاراً) في فندق «باربيزون». وأثناء استماعه للنقاشات، توزّع ذهنه بين التفكير بأنه صرف جهداً ضائعاً في بحوث أنجزتها هذه الثلة من العلماء وانتهت منها وبين الإحساس بأنه وضع يده على نقطة جديدة لم يتنبّه لها أحد من قبل. لقد جلب معه إلى نيويورك مسودة بحثه عن نظرية المعلومات، التي انتشرت معطياتها في «خربشات» على أوراق بأحجام متفاوتة جمعها في ملف سميك. وحاول الحصول على آلة كاتبة، من دون جدوى. وعاد حاملاً ملفّه، ليُخبر أصدقاءه عن عشاء أُقيم على شرف إدوارد لورنز، الذي بدأ المجتمع العلمي في إعطائه التقدير الذي استحقه منذ وقت طويل. وصعد لورنز إلى المنصة، ممسكاً بحياء بيد زوجته، وقف العلماء على أقدامهم مصفقين له في شكل متواصل. وصُدم شو للذعر الذي بدا مستولياً على ملامح لورنز.

وبعد أسابيع، غادر إلى بلدة «ماين» لزيارة منزل أبويه، بعد أن أرسل ورقة بحث منظّمة عن «نظرية المعلومات» إلى «مُسابقة لويس جاكو». ومرّ رأس السنة. وتعاون مكتب البريد مع شو، فثبت تاريخاً أبعد من الحقيقي على المُغلّف الذي يحتوي عليه بحثه! ولاقت نظريته التي ضمّت بعض التأملات الفلسفية وبراهين رياضيّة مُعقّدة وصور كارتون للشرح، استحساناً عالياً. وحصل شو على مال يكفي لتغطية رحلته إلى باريس لينال التكريم، إضافة إلى دعم بحوث «جماعة النُظُم الديناميكية». لقد كان إنجازاً صغيراً، لكنه جاء في وقت عسير بالنسبة لعلاقة الجماعة مع قسم الفيزياء. وقد احتاجت الجماعة التأييد المعنوي الذي أمنه الفوز بالجائزة، لكي يُنظر إلى آرائها بالجدية الكافية. وترك فارمر الفيزياء النظرية. وهجر باكارد الميكانيكا الإحصائية. ولم يكن كراتشفيلد سوى خرّيج حديث.

أعطى شو ورقته عنواناً لافتاً: «عن الجواذب الغريبة والسلوك الفوضوي وتدفق المعلومات». وطُبع منها ألف نسخة، قبل أن تصدر رسمياً. ومثّلت جهداً أولياً في محاولة الجمع بين نظرية المعلومات ومفاهيم الكايوس.

عمل شو على استعادة بعض المفاهيم المُهملة في الفيزياء التقليدية. إذ لفت إلى وجود الطاقة في النُظُم الطبيعية في مستويين حصرياً؛ يتصل أولهما بالمقاييس الكبيرة التي تضم أشياء الحياة اليومية القابلة للإحصاء والمقايسة. ويتعلق ثانيهما بالمقاييس الدقيقة حيث الذرات في حركة دؤوبة يصعب قياس طاقتها وحرارتها، إلا كمعدل وسطي. ولاحظ شو أن الطاقة الكليّة المختزنة في المقاييس الدقيقة قد تفوق في مجموعها نظيرتها في المقاييس الكبيرة. ولكن فيزياء النُظُم التقليدية لا تُلاحظ هذا الحراك الحراري إذ تعتبرها معزولة وغير قابلة للاستعمال وتافهة. ولا تصل مستوى تلك المقاييس. وأوضح أن: «لا يتعيّن معرفة الحرارة (في الذرات) عند درس المسائل الميكانيكية التقليدية». واستخلص شو أن النُظُم الفوضوية وشبه الكايوسية تصلح لتجسير الهوة بين هذين المستويين من المقاييس المتباعدة. وبعبارة أُخرى، رأى في الفوضى صناعة للمعلومات! والمعنى المقصود، أن الكايوس يولّد «معلومات» تعبر بين المقاييس المختلفة، وتصلح بالتالي لإيجاد جسر بين الطاقة على مستوى المقاييس الكبيرة ونظيرتها على مستوى المقاييس الصغيرة. من المستطاع إعطاء مثال على ذلك المفهوم. تخيّل ماءً يجتاز عقبة تعترض مساره. يعرف العلماء، وهواة ركوب الزوارق النهرية الصغيرة، أن تيار الماء السريع يولّد دوّامات تتجه إلى الداخل، عقب اجتيازه ذلك التضيُق. وعند سرعة معينة، تبقى الدوّامات في مكانها. وإذا زادت السرعة، تحرّكت الدوّامات. ويستطيع المتخصص بالتجارب أن يستخلص معلومات متنوعة من هذا النظام، باستعمال مجسّات للسرعة وغيرها من وسائل القياس.

ولكن، ثمة وسيلة أبسط: خُذ نقطة في دوّامة تقع مباشرة بعد التضيّق، وراقب تنقلها بين اليسار واليمين، في أوقات منتظمة. عندما تكون الدوّامة ثابتة، تتخذ المعلومات الشكل الآتي: يسار ـ يسار ـ يسار ـ يسار ـ يسار ـ يسار ـ يسار ـ يسار - . ولبرهة، يُحس المُراقب أن النظام لا يعطيه معلومات جديدة عن النظام. وإذا تحرّكت الدوّامة إلى الأمام والوراء بانتظام، تصبح المعلومات على النحو الآتي: يسار -يمين ـ يسار -يمين ـ يسار -

يمين ـ يسار-يمين ـ يسار-يمين ـ يسار-يمين ـ يسار-يمين ـ يسار-يمين-. ومرّة أُخرى، يكف النظام بسرعة عن إعطاء معلومات جديدة، مع أنه غدا أكثر إثارة قليلاً. وعندما يصل النظام إلى نقطة الفوضى، بفضل خاصية اللاتوقّع، يتولد تيار مستمر من المعلومات. وتُعطي كل ملاحظة جديدة «بتة» من المعلومات.

ويمثّل الأمر إشكالية بالنسبة إلى العالم التجريبي، إذا حاول وضع النظام في تصنيف ما بصورة حصرية. ويُنبّه شو إلى أن ذلك العالِم: «لن يغادر أرض التجربة... لأن النظام تحوّل إلى مصدر للمعلومات المستمرة». من أين تأتي تلك المعلومات؟ على مستوى المقاييس الصغيرة، ثمة بلايين من الجزيئات التي تتراقص في حراك له ديناميكيته الحرارية.

ويحمل اضطراب الماء الطاقة من مستوى المقاييس الكبيرة على السطح، فيعبر بها الدوّامات المتجهة إلى الداخل لكي تتبدّد تدريجاً في الأعماق، وتصبح مساوية للزوجة الماء التي تتشكل من طاقة الجزيئات على المقاييس الدقيقة. وبذا يحمل النظام الطاقة من المقاييس الكبيرة إلى الدقيقة.

وعلى غراره، تنتقل المعلومات في اتجاه مُعاكس من المقاييس الدقيقة إلى الكبيرة؛ بحسب نظريات شو ورفاقه من جماعة النُّظُم الديناميكية. ويُشكّل الجاذب الغريب القناة التي تنقل المعلومات من الداخل الدقيق إلى الخارج الكبير، مع إحداث تكبير ملائم، مثلما يُكبّر أثر جناح الفراشة الهيّن ليُحدث تغييرات كبرى في أنماط الطقس، بحسب ما تفيد نظرية الكايوس.

وبرز سؤال عن مقدار التكبير اللازم في تلك العملية. ووجد شو أن العلماء السوفيات أنجزوا ذلك الحساب. إذ أنجز أناتولي كولموغوروف وياشا سيناي مُعادلات رياضية متينة عن طريقة لحساب «الإنتروبيا في كل وحدة زمنية» وكذلك لتطبيقها على الصور الهندسية على أسطح الأعداد التي تتمدد وتتقلص في فضاء الحال. وتتمحور الفكرة المركزية لذلك الحساب على وضع مربع صغير حول مجموعة من مُعطيات

الظروف الأولية، كما يرسم الإنسان مربعاً على بالون. ثم تُحتسب تأثيرات التمدّدات المختلفة (وكذلك الالتواءات) لذلك المُربّع. ولربما يتمدّد باتجاه وحيد، مثلاً، فيما يظل منكمشاً في طرف آخر. ويتوازى التغيير في المساحة مع اللاتوقّع في النظام، بمعنى اكتساب معلومات أو فقدانها.

وبمقدأر ما، حملت كلمة «المعلومة» خيالاً عن اللاتوقّع، لكن السياق الذي وضعه شو للمعلومات جعلها مفهوماً يتناسب مع أعمال علماء مثل ديفيد ريبال. وأتاحت نظرية المعلومات لـ «جماعة النُّظُم الديناميكية» بناء هيكل من المنطق رياضياً، تحوّل إلى موضوع بحث عن مُنظّري الاتصالات. فمثلاً، اعتبر أن إضافة تشوش إلى نظام بدا حتمياً، بالنسبة لنمط التفكير السابق، شيئاً جديداً بالنسبة إلى علم الديناميكا، لكنها مسألة مألوفة في عالم الاتصالات.

لم تأت جاذبية «جماعة النُّظُم الديناميكية» وأفكارها من الرياضيات، إلا بصورة جزئية. وعندما تحدثت عن النُّظُم التي تولّد معلومات، استحضرت صورة الابتكار التلقائي للأنماط الجديدة في العالم. ووصف باكارد ذلك بقوله: «في القلب من العمليات المُعقّدة، ثمة عمليات تشبه ما يحصل في البيولوجيا التطورية أو في طرائق التفكير... وبديهياً، يبرز منطق واضح لتوليد المعلومات عبر تلك النُّظُم. وقبل بلايين من السنوات، لم يكن سوى سديم كوني، ثم برزت صورة الكون. إذاً، خُلِقت معلومات وخُزِّنت في هذا الكون.

وعندما تتأمل في مسار الإنسان من الطفولة إلى الشيخوخة، يُدركك انطباع بوجود المعلومات وأُخرى يجري توليدها بصورة مستمرة؛ بمعنى أنها تتولّد من روابط لم تكن موجودة سابقاً». لقد أدارت تلك الكلمات وما يُشبهها عقول حتى أشد الفيزيائيين تعقّلاً.

في البداية، لم تَحُز تلك الجماعة براعة كافية، فكأنها تعبث، لكنها باتت تحلم بأن تصنع جسراً بين الجواذب الغريبة والتجارب الكبرى في الفيزياء التقليدية. ثمة فرق بين قول إن يسار ـ يمين ـ يسار ـ يمين ـ يسار ـ يمين ـ يسار ـ يمين ـ يسار ـ يمين ـ يترافق

مع اللامتوقع وتوليد المعلومات، وبين أخذ تيار حقيقي من المعلومات وقياس ما يحويه من «مقدار البَدَد» (الإنتروبيا) و«مُعامِل لايبونوف» وأبعاد متنوعة. ومع ذلك، فقد أمسكت «جماعة النُظُم الديناميكية» بزمام تلك الأفكار. وبعيشها مع الجواذب الغريبة ليلاً ونهاراً، ترسّخت اقتناعاتها بأنها استطاعت ملاحظة ما تحتوي عليه الحياة اليومية من تقلبات وعبث وفوضى وتأرجح.

ودأبوا على ممارسة اللعبة التالية، إبان جلوسهم في المقهى. إذ يسأل واحدهم الآخر: أين يوجد أقرب جاذب غريب؟ هل هو في السياج الشائك المُهتز الذي يحيط بمرأب السيارات؟ أم لعله في العلم الذي يخفق عشوائياً في الريح؟ أو ربما تلك الورقة المتراقصة على غصنها؟ ويصف شو ذلك الضرب من التفكير مستشهداً بجملة شهيرة للمؤرخ العلمي مايكل كون: «إنك لن ترى شيئاً ما لم تصل إلى التشبيه الصحيح الذي يجعلك تُدركه».

وفي وقت سابق، اقتنع صديقهم بيل بروك، الاختصاصي في نظرية النسبية، بأن عدّاد سيارته يسير بطريقة لاخطيّة توحي بوجود جاذب غريب. وعلى غراره، صنع شو لنفسه نظاماً ديناميكياً «يعجز» خيال اختصاصيي الفيزياء: صنبور يرشح نقطة نقطة! يعتقد كثيرون بأن تساقط تلك النقاط يسير بطريقة منتظمة؛ لكن الحسابات المُدققة تُظهر غير ذلك. وبحسب كلمات شو: «إذا راقبتها بروية، يظهر لك نظام غير منتظم... وبمرور الوقت يصبح النمط غير متوقع. إذاً، يمكن لشيء بسيط مثل الصنبور الذي يرشح نقطة نقطة أن يولّد نمطاً من الابتكار الدائم».

وباعتباره مُولّداً للتنظيم، يُعطي ذلك الصنبور القليل من المساحة للعمل التجريبي. والحق إنه لا يولّد سوى قطرات من الماء، تُشبه السابقة منها اللاحقة، لكنه يُعطي المبتدأ في الاشتغال على الكايوس مثالاً له مزاياه.

يملك الجميع خيالاً عن ذلك الصنبور. إن تيار المعلومات التي يرسلها تتبع بُعداً وحيداً: نقاط مستقلة تولّد ضربات يتوالى إيقاعها بمرور الوقت.

لم تستطع «جماعة النُّظُم الديناميكية» العثور على ما يوازي تلك الصفات في النُّظُم التي درستها لاحقاً، مثل نظام المناعة عند الانسان، أو نظام اضطراب الأشعة في «المُسارع الخطيّ للجُسيمات الفيزيائية» (في جامعة ستانفورد القريبة) عندما شرع أداؤه في الانحدار تدريجاً. وقد حصل علماء تجريبيون مثل ليبشابيه وسويني على تيار مُعطيات ذي بعد وحيد بوضعهم مجساً في نقطة اعتباطية ضمن نُظُم أكثر تعقيداً. ويُعطي الصنبور ونقاطه الراشحة تياراً ذا بعد وحيد، وكذلك فإنه يتغيّر مع السرعة والحرارة ليكوّن سلسلة من أوقات التساقط. لو طُلب من فيزيائي تقليدي درس مثل ذلك الصنبور، فلربما ابتدأ بصنع نموذج فيزيائي كامل عنه. والحق أن العمليات التي تتحكم في صنع قطرات الماء وتساقطها، ليست مفهومة كلياً، وليست بالبساطة التي تظهر بها. يشكل مُعدّل التساقط متغيراً مهماً.

(لقد لاحظ شو ضرورة إبطاء هذا المُعدّل مقارنة بمعظم النُّظُم الهيدروديناميكية. واعتاد شو مراقبته عند سرعة تراوح بين ١ و١٠ في الثانية، ما يساوي ٣٠٠ غالون كل أسبوعين). ويتضمن النظام عينه متغيّرات أُخرى مثل لزوجة السائل ودرجة التوتر السطحي فيه. إذ تتدلى نقطة الماء، فإنها تتخذ شكلاً ثلاثي الأبعاد قبل أن تسقط. ويحتاج حساب ظهور ذلك الشكل إلى كومبيوتر متطور، بحسب ما يقوله شو. تُشبه نقطة الماء كيساً بلاستيكياً لدناً لسطحه الخارجي شدَة مُعينة، أي أنه يتمتع بتوتر سطحي مُحدد. وعند تأرجح الكيس - النقطة، فإنه يكتسب وزناً، وتتمدّد جُدرانه، إلى أن يصل الأمر إلى نقطة مُعينة فتسقط. إذا حاول فيزيائي صنع نموذج لسقوط قطرة ماء، فسيحتاج إلى مُعادلات تفاضلية لاخطيّة جزئية ومتراكبة،؛ مما يلقي به في لجّة عميقة.

ولكن، ثمة طريقة بديلة تتمثّل في نسيان الطابع الفيزيائي للنظام، والتركيز على المعلومات التي يعطيها، فكأنها تأتي من «الصندوق الأسود» في الطائرة. أفلا يستطيع المتمرّس في نظرية الكايوس أن يستخلص شيئاً مُفيداً من رصد سلسلة الأرقام التي تُمثّل الفترة بين القطرة والأُخرى؟ لقد تبيّن أن الجواب هو بالإيجاب.

ويستطيع ، كما برهنت التجربة، أن يُنشئ طُرقاً لتنظيم تلك المعلومات ثم العودة إلى دلالاتها في علم الفيزياء. وبذا، وجدت تلك الطُّرُق تطبيقاتها العملانية في رصد ظواهر الكايوس فعلياً.

ولم يتبع شو طريقة الفيزياء التقليدية، ولم تكن طريقته المبنية على الكايوس قد تبلورت. ابتدأ من نقطة في منتصف الطريق بين هذين الحدّين، فرسم «كاريكاتوراً» لنموذج فيزيائي، لخّص فيه وضع نقاط الماء مُتجاهلاً أشكالها المتغيّرة وحركتها المُعقّدة الثلاثية الأبعاد. وتخيّل أن وزنها ينمو تدريجاً بمرور الوقت. ومع نموها، ينشأ نوع من الزنبرك الذي يتمدّد إلى الأسفل باستمرار، بأثر من الوزن، ثم ينقطع. يسقط جزء من الوزن، بحسب ما افترض شو، بالتناسب مع سرعة تدلي تلك الكتلة عند وصولها لحظة الانقطاع.

وبعدها، يرتد باقي الوزن إلى الأعلى، إذ ينكمش الزنبرك. ويلي ذلك تذبذب تنطبق عليه القواعد المعروفة للزنبرك. إن الملمح المثير فعلياً في هذا التصوّر، والذي أتاح التوصّل إلى السلوك الفوضوي فيه، هو أن النقطة التالية تعتمد على التفاعل بين عنصرين: الزنبرك والوزن المتزايد لقطرة الماء.

إذ تُساعد حركة الزنبرك إلى الأسفل في وصول الوزن إلى نقطة الانقطاع بسرعة أكبر، والعكس صحيح أيضاً. وفي صنبور حقيقي، لا تتساوى قطرات الماء؛ إذ يعتمد حجمها على سرعة التدفق واتجاه حركة الزنبرك. فإذا ابتدأت نقطة في التشكّل أثناء تحرك الزنبرك إلى الأسفل، فإنها تنقطع بسرعة أكبر، والعكس صحيح كذلك . وبدا نموذج شو تقريبياً بحيث استطاع التعبير عنه بواسطة ثلاث مُعادلات تفاضلية، وهو الحدّ الأدنى اللازم لظهور نظام فوضوي، بحسب ما أشار اليه لورنز وبوانكاريه. ولكن، هل يستطيع هذا النظام مُحاكاة واقع الصنبور ونقاطه فعلياً؟ وهل تتساوى معه في درجة التعقيد؟

وبذا، ألفى شو نفسه جالساً في مختبره، مع وعاء بلاستيك فوق رأسه لكنه وعاء

ينتهي بصنبور نحاس من النوع الممتاز. وثبّت مصدراً ضوئياً تحت الصنبور. ومع سقوط كل نقطة، ينقطع خيط الضوء، فيُسجل كومبيوتر صغير في الغرفة المُجاورة الوقت. وفي الوقت نفسه، يتولّى كومبيوتر غير إلكتروني حساب المُعادلات التفاضلية الثلاث في كل فاصل زمني، أي عند سقوط كل نقطة، مما ولّد خطّاً مستمراً من المعلومات الافتراضية. وذات يوم، دفع شو الأمور إلى حدّ استعراضي، مُجرياً تجربة وصفها زميله كراتشفيلد لاحقاً بأنها تُشبه امتحان مُعادلة الشهادات الجامعية. فقد عمد إلى وضع قطعة من التنك تحت النقاط المتقاطرة، ثم سجّل أصوات ارتطاماتها على شريط.

وحلّل الأزيز بواسطة الكومبيوتر، فتولّدت أنماط تستطيع الأُذن تمييزها.

وأثناء عرضه للحل الرياضي للنظام، كان في وسع الحضور التثبت سماعياً من التركيب العميق الفوضوي للصنبور الراشِح. ولدفع الأمور خطوة أُخرى إلى الأمام، بحثت «جماعة النُّظُم الديناميكية» عن طريقة لجمع مُعطيات التجربة وتحويلها إلى مُعادلات رياضية والتوصّل إلى الجواذب الغريبة التي تميّز نُظُم الكايوس. ولو عملت الجماعة على نظام أكثر تعقيداً من الصنبور، لتخيَّلَتْ صنع رسوم بيانية عن المتغيّرات مع ربط أحدها مع الآخر، مثل ربط التبدّل في درجة الحرارة أو السرعة مع الفترات الزمنية التي تفصل النقاط بعضها عن بعض. ولكن نظام الصنبور لا يعطي سوى سلسلة من الأوقات المتواترة. ولذا، جرّب شو تقنية اعتبرت من أفضل ما صنعته جماعة النُّظُم الديناميكية، فكان إسهامها الأبرز في نظرية الكايوس.

وتمثّلت تلك الطريقة في إعادة هيكلة فضاء الحال على نحو يناسب وجود جاذب غريب غير مرئي فيه، وكذلك فمن الممكن تطبيقه على أي تسلسل من المعلومات. واستطاع شو أن يصنع رسماً بيانياً من بُعدين، بالاعتماد على خيط المعلومات، ذي البُعد الواحد الذي أمدّه به الصنبور الراشح. وجعل أحد المحاور يُعبر عن الوقت الذي يفصل بين نقطتين والآخر عن الفارق الزمني بين النقطة الأخيرة والتالية. فإذا مر ١٥٠ ميللي ثانية بين النقطة الأولى والثانية، ثم ١٥٠ ميللي ثانية بين الثانية والثالثة، فإنه يرسم نقطة وحيدة

على تقاطع الخطين البيانيين الموازيين للقيمتين ١٥٠ و١٥٠. ربما بدا النظام بسيطاً، لكنه مُعبّر. فإذا تهاطلت النقاط بانتظام، يُصبح شكل الرسم البياني غبياً، إذ لا تغادر أرقامه النقطة عينها على الرسم البياني... تقريباً.

ويتمثّل الفرق الأول بين صنبورين الافتراضي (على الكومبيوتر) والحقيقي، في تعرّض الحقيقي للتشوّش، بما جعله حساساً باطراد. وسخر شو من ذلك بمرارة إذ قال: «تبيّن أنه شيء يُشبه الزلزال... لأنه يفلح في نقل التشوش من المقاييس الصغيرة إلى الكبيرة». ودفع ذلك بشو إلى العمل ليلاً، حين تتلاشى حركة الأقدام وضوضاؤها التي تُشوش على الصوت، مما يجعل الكومبيوتر يُسجّل لُطخاً بدل النقاط! ومع زيادة مُعدّل التدفق، تُظهر الرسوم البيانية عن النظام تفرّعاً يحتوي على تضاعف الدورات. إذ تسقط النقاط مزدوجة أحياناً. ويتأرجح الفاصل الزمني بين ١٥٠ ميللي ثانية، مثلاً، وثمانين. ويرسم الكومبيوتر فقاقيع غير مشوشة، إحداها عند نقطة ١٥٠ و٨٠ والثانية عند نقطة ٨٠ و١٥٠.

ويأتي الاختبار الحقيقي عندما يصبح النمط فوضوياً. فعندما يُصبح عشوائياً تماماً، تتناثر النقاط فوق الرسم البياني كله. ولا توجد علاقة بين فترة زمنية وأُخرى. ولكن، عند وجود جاذب غريب كامن في المعلومات، فإنه يُظهر نفسه على شكل تلاصق بين اللُطخ المُشوّشة ويرسم تراكيب مميّزة. وكثيراً ما يتطلب الأمر ثلاثة أبعاد لرؤية التركيب المُعبّر عن الجاذب الغريب، ولكن ذلك لا يمثل مشكلة. فمن المستطاع تعميم التقنية التي اكتشفها شو ورفاقه لاستعمالها في توليد رسوم بيانية متعددة الأبعاد. فبدل أن نرسم الفترة الزمنية على محور، وتلك التي تليها على محور ثان؛ يمكن أيضاً صنع محور ثالث من الفترة الزمنية التي تفصل الثانية عن الثالثة. ثمة خدعة ذكيّة في هذه التقنية تعطيها سحرها.

ففي العادة، يلزم ثلاثة متغيّرات لصنع رسم ثلاثي الأبعاد. وتُقدّم هذه الطريقة تلك الأبعاد الثلاثة انطلاقاً من بُعد وحيد، وتعكس ايمان «جماعة النُظُم الديناميكية» بوجود نظام دفين في الفوضى الظاهرية، بحيث يُعبّر عن نفسه حتى لو لم يستطع من يُجري

التجربة العثور على المتغيّرات الثلاثة اللازمة أو أخفق في قياسها مباشرة. وبحسب تعبير فارمر: «عندما تُفكّر في المتغيّر، فإنك تُدرك أن تطوره يعتمد على عدد من المتغيّرات الأُخرى التي تتفاعل معه باستمرار. ويفترض أيضاً أن قيمها مُحتواة في تاريخ ذلك الشيء (المُتغيّر). لا بد من وجود شيء ما يدل إلى هذه الأمور». وقد أظهرت الرسوم البيانية عن الصنبُور الذي يرشح ماءً، صحة ذلك التفكير. ففي الرسوم الثلاثية الأبعاد، ظهرت أنماط تشابه خيوط الدخان المُلوّنة التي تنبعث من طائرات الاستعراض. واستطاع شو أن يُضاهي اللطخات التي تُعطيها التجربة فعلياً ونظيراتها التي ينتجها الكومبيوتر غير الإلكتروني. وتجسّد الفرق بينهما في أن الرسوم الفعلية ظهرت دوماً أكثر تشوّشاً. ولكن، بقي التركيب واضحاً. وشرعت «جماعة النُّظُم الديناميكية» في التعاون مع علماء مثل هاري سويني الذي انتقل إلى جامعة تكساس في «أوستن»، فتعلم أفرادها كيفية مُلاحظة الجاذب الغريب في أنواع النُّظُم كلها. فقد تطلّب ذلك وضع المُعطيات في فضاء حال له أبعاد كافية. وبسرعة، صنع فلوريس تاكنز، الذي اخترع الجاذب الغريب مع ديفيد ريبال، نظاماً رياضياً مُعبّراً عن التقنية التي توصلت إليها تلك الجماعة. وكما اكتشف الكثيرون من العلماء لاحقاً، تُميّز تلك التقنية بين التشوش المحض وبين الفوضى، باستعمال مفهوم جديد هو قدرة المُعادلات البسيطة على صنع فوضى منتظمة. إن الفوضى العشوائية ترسم نقاطاً تنتثر فوق فضاء الحال بطريقة غير مُحدّدة.

وأما الكايوس، المُتّسم بالحتمية والنمط، فإنه يجذب المُعطيات ليصنع منها أشكالاً مرئية. ومن بين مسارات كثيرة للفوضى، تبنّت الطبيعة حفنة من الخيارات.

حافظت «جماعة النُّظُم الديناميكية» على روحها المتمردة، على رغم القبول الواسع لأفكارهما وبحوثهما. وكثيراً ما انغمس أفرادها، سواء في المقهى أو في المختبر، في المحاجّة ضد فكرة أن فترة الدهشة البكر قد انتهت.

ومراراً، سُمِع كارتشفيلد يصيح محتجاً بأنهم ما زالوا يجرّبون، وما زالت نتائج أفعالهم تدهشهم تماماً، مما يعني أن الكثير من العمل الأساسي لم ينجز بعد. لقيت

الجماعة دعماً من علماء مثل عالم الرياضيات رالف أبراهام، الراعي الكبير لأعمال ستيفن سمييل، والفيزيائي بيل بروك، الذي أطلق على نفسه لقب «قيصر الكومبيوتر غير الإلكتروني». وألفَت كلية الفيزياء نفسها في وضع صعب. ولاحقاً، أصرّ أساتذتها على نفي التجاهل واللامبالاة والمعارضة التي واجهت بها تلك الكلية شو ورفاقه. وردّت جماعة «النُظُم الديناميكية» بمرارة على ما اعتبرته مراجعة تاريخية من قِبَل الذين تحولوا متأخرين لتبني نظرية الكايوس بعد رفض طويل. وتحدث شو عن ذلك بالقول: «لم يكن لنا أي أستاذ ليُشرف على البحوث، ولم يخبرنا أحد ما يجب علينا فعله... لقد نُظر إلينا كمُعارضين لسنوات طويلة.

وما زال البعض ينظر إلينا على هذا النحو إلى يومنا هذا. لم نتلق تمويلاً من «سانتا كروز». عمل كل منا لفترات طويلة من دون أجر... وسرنا على رسلنا من دون توجيه ولا إرشاد». وفي المقابل، تُعطي الكلية رواية مُغايرة. لقد تحمّلت وتسامحت لوقت طويل من الزمن مع أبحاث لم يكن واضحاً أنها تقود إلى أي شيء مُجد. ودفع البروفسور المُشرف على أطروحة شو عن التوصيل الفائق راتباً منتظماً للمتدرب عنده، لمدة تزيد على العام، على رغم علمه بخروج شو عن موضوع التوصيل وفيزياء البرودة. لم يأمر أحد بوقف الأبحاث عن الكايوس. وفي أسوأ وصف، مارست الكلية سياسة عدم التشجيع المتسامح حيال تلك الجماعة. ودوماً، وُجد من ينخرط في حديث صريح وودي مع هذا أو ذاك من أفراد الجماعة. وحُذّروا من إمكان عدم تلقي الدعم، بعد نيلهم شهادة الدكتوراه، لإيجاد عمل مناسب، ببساطة لأن المجال الذي يبحثون فيه لم يكن موجوداً فعلياً! وتشدد الكلية على أن الكايوس، حينها، بدا أقرب إلى «الصرعة» والهوس العابر، فلو أنه تلاشى، لوجدت الكلية نفسها في وضع يصعب عليها تبريره.

ومع ذلك، وخارج ذلك الحرم القابع في ظل الأشجار الحُمر في «سانتا كروز»، شرع الكايوس في اجتراح مؤسسته العلمية الخاصة، فتوجب على «جماعة النُظُم الديناميكية» الالتحاق بها.

فذات سنة، مرّ ميتشل فايينبوم بـ«سانتا كروز» لإلقاء مُحاضرات يشرح فيها مفهوم «النظرية الشاملة». وكعادته، تحدث فايينبوم بلغة رياضية مُعقّدة لا تُدركها سوى النخبة إذ لم تكن نظرية «مجموعة إعادة التطبيع» سوى عمل صعب في صلب الفيزياء النظرية.

وإضافة إلى ذلك، لم تهتم جماعة شو بالخرائط ذات البُعد الواحد المتصلة بنظرية فايينبوم. وفي تلك الأثناء، تناهى إلى سمع دويني فارمر أن اختصاصياً في الرياضيات في جامعة بيركلي، اسمه أوسكار لانفورد الثالث، يرود آفاق الكايوس، فذهب إليه مستطلعاً. وأصغى لانفورد إلى محدّثه بلباقة. ثم نظر إلى فارمر مُعلناً أن ليس لديه ما يقوله، لأن جلّ ما يحاوله هو فهم نظرية فايينبوم. فكّر فارمر في أن الأمر برمّته يبدو غريباً. فكيف يترك عالماً لامعاً مثل لانفورد الصورة الكبيرة للأشياء، لينشغل بتلك المدارات الصغيرة التي يتحدث عنها فايينبوم. وحينذاك، كُنّا مشغولين بـ«نظرية المعلومات» وآفاقها الواسعة، التي تُحلّل الكايوس وتسعى لرؤية المصدر الذي يولّد الفوضى، وربطه مع «مقدار البَدَد «الإنتروبيا» و«مُعامِل قوة لايبونوف» للخروج بمقاييس لها أرقام ملموسة».

وأثناء الحوار بين الرجلين، لم يُشدّد لانفورد على «النظرية الشاملة». لذا، لم يُلاحظ فارمر أنه أخطأ في فهمه كلياً. ولاحقاً، اعترف فارمر بخطئه: «نجم ذلك من بساطتي الأصيلة... لم تكن نظرية فايينبوم الشاملة مجرد نتيجة، بل أيضاً تقنية تستطيع أن تشرح جيشاً من الظواهر غير المُفسّرة. عند تلك النقطة، بدت الأنظمة اللاخطيّة وكأنها أشياء تجب دراستها كلاً على حدة. لقد حاولنا التوصّل إلى لغة لوصفها وصوغها بطريقة كميّة، لكن بدا وكأن لا شيء يجمع حالاتها المتفرقة. ولم نر طريقة لتصنيف تلك النُّظُم في مجموعات بحيث ينطبق حلٌ بعينه على كل مجموعة منها، كحال النُّظُم الخطيّة. وفي المقابل، توصلت «النظرية الشاملة» إلى تلمّس صفات قابلة للقياس الكميّ في النُّظُم اللاخطيّة كلها. وبذا صارت تلك الصفات قابلة للتوقع. إنه أمر فائق الأهمية... ثمة عنصر سوسيولوجي (اجتماعي) زاد أهمية

«النظرية الشاملة». فقد عمل فايينبوم على ترجمة منجزاته إلى لغة الرياضيات المتضمنة في نظرية «مجموعة إعادة التطبيع». وبذا، صارت نظريته مفهومة لدى الدارسين الذين تعاملوا سابقاً مع ذلك النوع من الرياضيات، ومن ضمنهم المتخصصون في دراسة الظواهر الحرجة مثل التغيير في أعداد السكان والمجموعات الحيّة. وحدث ذلك في وقت بحث أولئك المتخصصون، بدورهم، عن أدوات عمل جديدة. وتلاقى الطرفان، فانبثق تخصّص لم يكن موجوداً سابقاً».

وفي مسار مستقل، ابتدأ عمل جماعة «سانتا كروز» في إعطاء ثماره. وأخذ نجمها يصعد في قسم الفيزياء، خصوصاً بعد ظهورها المُفاجئ في مؤتمر عن فيزياء المادة المُكثّفة في منتصف شتاء العام ١٩٧٨.

ونظم المؤتمر برناردو هبرمان، من «مركز بالو آلتو لبحوث زيروكس»، بمساعدة من جامعة ستانفورد. ولم تُدع الجماعة إليه، لكنها ذهبت إليه. وحشر أفرادها أنفسهم في سيارة نصف شحن من نوع «فورد ١٩٥٩» امتلكها شو. وحملوا معهم جهازاً تلفزيونياً كبيراً يصلح كشاشة عرض ومشغّلاً لأشرطة الفيديو. وصودف أن تخلّف أحد المحاضرين، فاستعاض عنه هبرمان بكلمة لشو. كان التوقيت رائعاً. فحينذاك، شغلت نظرية الكايوس علم الفيزياء، من دون أن تُعرف تفاصيلها على نطاق واسع. واستهل شو حديثه بشرح الجواذب وعلاقتها مع فضاء الحال. وبيّن أنها تظهر بداية كنقاط ثابتة (حيث يتوقف كل شيء)، ثم دورات محدودة (حيث يتذبذب كل شيء)، ثم تغدو جواذب غريبة (كل ما يلي ذلك). وعرض رسوماً غرافيكية للجواذب من صنع الكومبيوتر، على شاشة العرض التلفزيونية.

(صرح لاحقاً أنه يعتقد بأن العرض البصري له قوة التنويم المغناطيسي). ووضع ألواناً خاصة لإظهار جاذب لورنز والصنبور الذي يرشح ماء. وشرح الهندسة المتصلة بهذين الشيئين، مُبيّناً كيفية تمددها وتقلصها وثنياتها. وشرح دلالة تلك الهندسة بالنسبة إلى «نظرية المعلومات». واختتم كلمته بالحديث عن التغيير في النموذج، والذي يعلم

الحاضرون أنه اقتباس من المؤرخ ميشال كون يشير إلى لحظة حدوث ثورة في العلم. ونالت كلمته صدى طيّباً، فاعتبرت نجاحاً كبيراً. وزاد من تألقه أن كثيراً من الحاضرين مروا سابقاً بـ«سانتا كروز»، ولكنها المرة الأولى التي يرون فيها الكايوس بعيون زملائهم المتخصّصين فيه.

في العام ١٩٧٩، حضر أعضاء الجماعة لقاء عن الكايوس في «أكاديمية نيويورك للعلوم».

وشاركوا هذه المرة كمدعّوين، لأن حقل التخصص في نظرية الفوضى دخل في طور التوسّع الانفجاري. وفي العام ١٩٧٧، كان نجم اللقاء عينه إدوارد لورنز، وحضره عشرات من العلماء. وأما لقاء العام ١٩٧٩، فقد احتكره فايينبوم، وحضره مئات العلماء. وفي المكان عينه الذي لم يستطع روبرت شو العثور على آلة طابعة لكتابة ورقته ليقدّمها للحضور، ولو في غرف الفندق، تألّقت جماعة النُّظُم الديناميكية. ونُظر إليها كمركز للطباعة، إذ طبعت أوراقها المتعددة بسرعة، ودوماً ظهرت أسماء المشاركين جماعياً فيها.

لكن الجماعة لم تستمر إلى الأبد. وكلما اقتربت من وقائع المجتمع العلمي، تفكّكت أواصرها. فذات يوم، اتصل برناردو هبرمان بالجماعة باحثاً عن روبرت شو، فرد عليه كراتشفيلد. وقد احتاج هبرمان لمن يكتب ورقة علمية متماسكة ومبسطة عن نظرية الفوضى (الكايوس)، فطلب شو. وأحس كراتشفيلد بأنه مُحاصر في صورة «فتى الكومبيوتر». وأدرك أنه سيواجه سريعاً اليوم الذي تُقوّم فيه أعماله كفرد، وليس كعضو في جماعة. وإضافة إلى ذلك، تمرّس هبرمان في الفيزياء حتى إنه يستطيع التعرّف فوراً إلى العمق الفيزيائي في أي عمل علمي. وقد ثارت شكوك هبرمان في قيمة عمل الجماعة عندما عاين مختبرهم، الذي ذكّرهم بحركة «الهيبيز» في الستينات. وفي المقابل، احتاج هبرمان للكومبيوتر غير التقليدي الذي تعمل عليه المجموعة، والذي تمكّن كراتشفيلد من جعله يعمل ساعات متواصلة. ووصل الحديث بينهما إلى نقطة أوضح فيها كراتشفيلد أن

«الجماعة كلها ستشارك»، فرفض هبرمان ذلك فوراً. ورد بالقول إنه يسعى إلى شريك وحيد وواضح، لكي يتحمّل المسؤولية كاملة في حالتي النجاح والفشل. ونال هبرمان ما سعى إليه. واستطاع الحصول من كراتشفيلد على الورقة الأولى التي تُنشر في مجلة علمية أميركية (فيزيكال ريفيو ليترز) عن الكايوس، فمثّلت اختراقاً في علم الفيزياء. ويُظهر الأمر أيضاً تضلّع هبرمان في سياسات المجتمع العلمي، لأنه أدرك أن تلك الورقة ستُحدث أثراً مدوياً، فيما نظرت إليها الجماعة كشيء عادي. وحدث ما توقّعه هبرمان. ونالت الورقة صيتاً ذائعاً. لكنها تسبّبت أيضاً في تفكك الجماعة. فقد غضب فارمر لما اعتبره انشقاقاً من جانب كراتشفيلد. ولم يكن الأخير وحيداً في كسر دائرة الانتماء للجماعة. فسرعان ما تبعه باكارد ثم فارمر نفسه، عبر تعاونهما مع فيزيائيين وعلماء رياضيات من الدوائر العلمية التقليدية، مثل هبرمان وسويني ويورك. وصارت الأفكار التي وُلدت في دهاليز «سانتا كروز» جزءاً من المناهج الحديثة في درس النُّظُم الديناميكية.

وهكذا، تكرّس تقليد يفرض على الفيزيائي الراغب في التعرّف على «مُعامِل البدَد» (الإنتروبيا)، أن يستعمل حاسوباً غير إلكتروني من نوع «سيسترون دونر» مع شاشة لرسم الذبذبات. وتناقش اختصاصيو الطقس عن الفوضى في الغلاف الجوي والمحيطات وأبعادها وعلاقتها مع الجواذب الغريبة. ودرج الخبراء الاقتصاديون على تحليل مُعطيات الأسواق بحثاً عن جواذب غريبة تعمل عبر أبعاد بسيطة. وكلما انخفض عدد الأبعاد، صار النظام أكثر بساطة.

ويجب على الجميع الإحاطة بمجموعة من المصطلحات المستجدة، مثل الأبعاد الفراكتالية، و«مُعامِل قوة لايبونوف» و«أبعاد هودسروف» والبُعد المعلوماتي؛ والتي تأتي من المقاييس المعتمدة في النُّظُم الكايوسية. وبرع يورك وفارمر في شرح تلك المفاهيم. وقدّما أبعاد الجاذب الغريب على أنها «المستوى الأول من المعرفة التي تلزم للتعرف إلى صفات النظام الفوضوي. ووصفاه بأنه الملمح الذي يُعطي «كمية المعلومات المطلوبة لتحديد موقع نقطة بالنسبة إلى جاذب غريب، ضمن مدى مُحدّد

من الدقة». وربطت الطُّرُق التي طوّرت في «سانتا كروز» تلك الأفكار مع مقاييس مهمة في النُّظُم مثل توقع معدل التلاشي التلقائي للتوقُّع، ومعدل سريان المعلومات، ونسبة الميل إلى التمازج.

وفي بعض الأحيان، ألفى العلماء الذين يستخدمون تلك الطُّرُق أنفسهم منغمسين في صنع رسُوم بيانية، ورسم مربعات صغيرة فيها، واحتساب عدد النقاط في كل مُربّع. وخدمت تلك الأشياء في وضع نظرية الفوضى ونُظُمها، وللمرة الأولى، في متناول الفهم العلمي الشائع.

وفي الوقت عينه، درّب العلماء أنفسهم على ملاحظة الجواذب الغريبة في خفق الأعلام وتقلبات عدادات السرعة في السيارات، باحثين عن ظواهر تشير إلى حتمية الكايوس في أدبيات علم الفيزياء الحديث ومعارفها. وعثروا على أشياء مثل التشوّش غير المُفسّر والتقلّب المُفاجئ واختلاط الانتظام واللاانتظام، في تجارب علمية متعددة تمتد من مُسارع الجزيئات إلى أشعة الليزر وأجهزة رسم الذبذبات. وعمل اختصاصيو الكايوس على تبنّي تلك المسائل، والتعاون مع علماء من مجالات متنوعة للتوصل إلى حلول لها.

وعندما أزف الوقت لتغادر «جماعة النُّظُم الديناميكية» مقرها المكين في «سانتا كروز»، كان الكثير من العلماء في ذلك الصرح العلمي قد تحولوا إلى تبني نظرية الفوضى.

وأحس علماء آخرون أيضاً، وبنظرة استرجاعية، أن «سانتا كروز» فوّتت على نفسها فرصة أن تغدو المركز الوطني الأول للبحوث عن الديناميكا اللاخطيّة، الأمر الذي التقطته مراكز علمية أُخرى. وفي مطلع ثمانينات القرن العشرين، تفرّقت «جماعة النُّظُم الديناميكية». أنهى شو أطروحته في العام ١٩٨٠. وعلى غراره فعل فارمر في العام ١٩٨١، وباكارد في العام ١٩٨٢.

وأنهى كراتشفيلد أطروحته في العام ١٩٨٣، فجاءت ثبتاً عن أعمال المجموعة.

واحتوت نحو ١١ ورقة سبق نشرها في المجلات العلمية للرياضيات والفيزياء. والتحق بجامعة كاليفورنيا في بيركلي. وانضم فارمر إلى «القسم النظري» في مختبر «لوس آلموس». وذهب شو وباكارد إلى «معهد الدراسات المتقدمة» في جامعة برنستون. وتضلّع كراتشفيلد في التغذية الراجعة في أشرطة الفيديو. وعمل فارمر على «الفراكتال السمين» وصنع نماذج عن الديناميكيات المُعقّدة في نظام المناعة عند الإنسان. واشتغل باكارد على الفوضى زمنياً وعلاقتها مع تكوّن ندف الثلوج. ومال شو وحده إلى الفيزياء التقليدية. ولم يترك سوى ورقتين مهمتين: تلك التي ذهبت إلى المسابقة الفرنسية، والأُخرى عن الصنبور الراشح ماء وقد نجحت في جمع كل بحوثه في «سانتا كروز». وفي مرات عدّة، فكر في ترك العلم كليّاً. وبحسب ما أسرّ به لأحد أصدقائه، كان هو نفسه يتذبذب.

الإيقاعات الداخلية

«لا ترمي العلوم إلى الشرح، ولا تحاول التفسير، بل تُركّز على صنع النماذج. ويتألّف النموذج من بناء رياضيّ يصف ظاهرة تخضع للمراقبة، إضافة إلى مجموعة من التفاسير الشفوية. لا يبرّر مثل ذلك البناء الرياضيّ إلا بقدرته على العمل».

جون فون نيومان

نظر برناردو هبرمان إلى مستمعيه في القاعة الفسيحة، وقد ضمّت صفوفهم علماء في البيولوجيا النظرية والتجريبية، واختصاصيين في الرياضيات البحتة، وأطباء واختصاصيين في الطب النفساني. وسرعان ما أدرك أنه يواجه مشكلة تواصل. لقد فرغ تواً من إلقاء كلمة غير اعتيادية في اجتماع غير اعتيادي: اللقاء الأول عن نظرية الفوضى (الكايوس) في البيولوجيا والطب (١٩٨٦). ورعت اللقاء «أكاديمية نيويورك للعلوم» و«المعهد الوطني (الأميركي) للصحة العقلية-النفسية» و«مكتب البحوث في البحرية (الأميركية)». واستضافته قاعة «ماسور» في مقر مؤسسة «معاهد الصحة الوطنية (الأميركية) قرب العاصمة واشنطن. ورأت عينا هبرمان عدداً من الوجوه المألوفة، مثل اختصاصيي الكايوس، إضافة إلى الكثير من الوجوه غير المعروفة لديه.

وتوقّع المتحدث أن جمهوره يعاني بعض التململ الناجم من اقتراب موعد استراحة الغذاء. اهتم هبرمان ذو الأصول الأرجنتينية والمقيم في ولاية كاليفورنيا، بنظرية الفوضى منذ لقائه مع «جماعة النُّظُم الديناميكية». وشغل منصب باحث في «مركز بحوث بالو آلتو» التابع لشركة «زيروكس». واعتاد الاهتمام بمشاريع تخرج عن اهتمامات ذلك المركز، وقد انتهى لتوّه من عرض أحد تلك المشاريع: نموذج عن الاضطراب في حركة العين لدى مرضى الفُصام (الشيزوفرينيا). لقد عمل الأطباء النفسانيون أجيالاً ليتوصلوا إلى تعريف للشيزوفرينيا ولتصنيف مرضاها. وأثبت ذلك المرض دوماً أنه يصعب وصفه بمثل صعوبة علاجه. وتتجلّى معظم أعراضه في اضطراب التفكير والسلوك.

ومنذ العام ١٩٠٨، عرف العلماء أن أحد الأعراض الجسمانية للمرض يظهر في المرضى كما في أقربائهم. فعندما يحاول المريض مراقبة «رقّاص ساعة» يتأرجح ببطء، لا

تستطيع عيناه ملاحقة تلك الحركة الانسيابية. وفي الوضع الطبيعي، تتمتع العين بالكثير من الحذق. ويستطيع الانسان اعتيادياً إبقاء عينيه مُركّزتين على الأهداف المتحركة، حتى من دون بذل جهد ذهني، إذ تبقى الأشياء المتحركة مرسومة على شبكية العين. وبكلام آخر، تتابع العين الأشياء المتحركة في انسيابية تامة. وفي حال مرضى الشيزوفرينيا، تسير العين في قفزات فجائية، وبمسافات صغيرة، بدل أن تنساب في متابعة الهدف، فيظهر الشيء المتحرك وكأنه مُحاط دوماً بغشاء خفيف. ولم يُفسّر أحد هذه الظاهرة.

وتراكمت مُعطيات لدى اختصاصيي علم وظائف الأعضاء (الفيزيولوجيا)، على هيئة رسوم وجداول، تُظهر أنماطاً من تلك الحركة الفجائية في العين. ومالوا للاعتبار عموماً، أن التنقلات في وضع العين تأتي من تنقلات موازية في الإشارات الكهربائية الصادرة من المركز الذي يتحكَّم بحركة العين في الجهاز العصبي المركزي. وربطوا بين التشوش في الإشارات الصادرة من المركز وتلك التي تصله من المراكز العليا في الدماغ. ولذا، استنتجوا أن الاضطراب في حركة العين ناجم من التشوّش في أذهان مرضى الفُصام. وأما هبرمان فقد افترض العكس تماماً، أي أن القفزات المُفاجئة في حركة العين هي التي تُشوّش ذهن المريض. وصنع نموذجاً ليوضح افتراضه. وفكر في أبسط الطرق لوصف حركة العين ميكانيكياً عبر مُعادلات رياضية.

وفي العلم، ثمة مصطلحات مُحدّدة لوصف مدى تأرجح «رقّاص الساعة»، ولمعدل التأرجح، ولقوة الدفع الذاتي في حركة العين، وللاحتكاك، ولتباطؤ الحركة، وللانحراف في البصر، وللطريقة التي تلاحق فيها العين الأشياء المتحركة.

وشرح هبرمان لمستمعيه، أن المُعادلة التي توصّل إليها تشبه نظاماً ميكانيكياً غير إلكتروني، يتألّف من كرة تتدحرج داخل فتحة مُقوّسة؛ فيما الفتحة نفسها تتمايل من جانب إلى آخر. وتتوازى الحركة الجانبية مع حركة «الرقّاص»، وتُمثّل جدران الفتحة الانحراف في البصر ومحاولة العين تصحيح الصورة، بحيث أنها تدفع الكرة دوماً نحو المركز. وفيما بات أسلوباً معيارياً لتقصي تلك المُعادلات، أسلم هبرمان نموذجه للكومبيوتر، ثم بدأ في

التلاعب بالمتغيّرات مع الرسوم البيانية التي تنجم من تلك العملية. ووجد مزيجاً من الانتظام والفوضى.

وفي بعض الأحيان، تابعت العين بانسيابية الأشياء المتحركة، ثم، ومع التغيير في درجة اللاخطيّة في النظام، شرعت العين في التقافز بالتوازي مع انتقال النظام إلى حال من تضاعفُ الدورات. وجاءت النتيجة نظاماً من الاضطراب الكايوسي يتطابق مع ما وصفته الأدبيات الطبية طويلاً.

وفي النموذج، لا يتصل السلوك الفُجائي بأي نوع من الإشارات الخارجية. وينجم بصورة حتمية من ارتفاع درجة اللاخطيّة في النظام. وبالنسبة إلى بعض الأطباء ممن استمعوا إليه، بدا نموذج هبرمان وكأنه متناسب مع النموذج الجيني عن مرض الشيزوفرينيا. ويمكن عنصر اللاخطيّة في النظام أن يزيد في ثباته، كما باستطاعته إدخاله في مرحلة الفوضى.

وتعتمد النتيجة على قوة اللاخطيّة ووهنها، مما يوحي بتغيّر وراثي من عنصر جيني وحيد. وقارن أحد الأطباء النفسانيين هذا المفهوم بما يحدث في مرض النقرس، حيث يؤدي الارتفاع في مستوى الحمض البولي (اليوريا) إلى إحداث أعراض مرضية. وأشار آخرون، ممن اعتادوا الأدبيات الطبية أكثر من مُحاضرهم هبرمان، إلى أن المُصابين بالشيزوفرينيا لا يتفردون بتلك الظاهرة؛ بل يمكن العثور على مجموعة من الاضطرابات في حركة العين في الأنواع المختلفة من الأمراض العصبية. ومن المستطاع ملاحظة تذبذبات دورية، وتذبذبات غير دورية، وأنواع مختلفة من السلوك الديناميكي في المعلومات المتراكمة في الأدبيات الطبية، إذا نُظر إليها باستعمال أدوات التحليل في نظرية الكايوس.

وبالنسبة لكثير من العلماء الذين استمعوا إلى تلك المحاضرة، فإن ما قاله هبرمان يصلح لاستخلاص خطوط لأبحاث جديدة. وبالنسبة لآخرين، بدا نموذجه مُبسّطاً بطريقة فجّة. وعندما انتهى المُحاضر من الكلام، جاء بعض الأسئلة محمّلاً بالكثير من الاحباط،

مثل: «مشكلتي هي أن أعرف كيف توصلت إلى هذا النموذج»، و«لماذا ننظر إلى عناصر الحركة اللاخطيّة، وخصوصاً التفرّعات والحلول الكايوسية». وأطرق هبرمان هنيهة، ثم شرع في الإجابة: «لقد فشلت في صوغ الهدف من النموذج. من الواضح أنه بسيط. وربما قال بعضكم إنه يعرف جيداً ما قلته، ولكنه يريد أن يعرف رأيي في سبب حصوله. إذاً، فما هي احتمالات ذلك السبب؟ من الناحية الطبية، يبدو أن التفسير الوحيد هو وجود شيء ما في الدماغ يسبب ذلك التقافز في حركة العين.

وبالنسبة إليَّ، كعالم فيزياء مُتخصص في نظرية الكايوس، أعرف أن أبسط نموذج لاخطّي عن حركة ملاحقة العين للأشياء المتحركة، الأبسط على الاطلاق، يستطيع أن يُعطي تلك الملامح المميزة لحركة العين عند مرضى الشيزوفرينيا، وبغض النظر عن التفاصيل عن طبيعة تلك الأشياء. إذاً، فلربما كان الأمر أنه لم يجرِ التفكير في تلك الأعراض باعتبارها ناجمة من نظام كايوس داخلي في حركة العين نفسها. لا يملك النموذج أي عنصر عن الأعصاب وعملها. وكل ما أقوله أن أبسط نظام للملاحقة هو شيء يميل لتوليد الأخطاء وكذلك للتوقف كلياً. بهذه الطريقة نُحرّك أعيننا. وبتلك الطريقة تتابع اللواقط الطائرات. باستطاعتكم تطبيق هذا النموذج على أي شيء».

وفي القاعة، وقف اختصاصي في البيولوجيا ممسكاً بالميكروفون. وبدا مُحبطاً من التبسيط العددي في نموذج هبرمان. وأشار إلى أن حركة العيون فعلياً تتألّف من نظام فيه أربع عضلات تعمل بتناغم وتزامن. وخاض في وصف تقني لما قد يعتبره نموذجاً واقعياً عن حركة العين، شارحاً أنه لا يمكن حذف كتلة العين من المُعادلات، لأن العين ثقيلة بالنسبة إلى النظام العضلي الذي يثبّتها. وأضاف: «ثمة تعقيد آخر. إن النسبة من وزن العين التي يتعامل مع النظام الحركي، تعتمد أيضاً على سرعة الدوران، لأن قسماً من الوزن «يتأخر» عندما تتسارع العين، وذلك بسبب اللزوجة العالية للسائل الذي يملأ العين من الداخل». وتلا ذلك صمت. وبدا هبرمان مذهولاً.

وأخيراً، تحرّك أحد مُنظّمي المؤتمر من الميّالين لنظرية الفوضى، اسمه أرنولد ماندل

ويعمل طبيباً نفسانياً، وأخذ الميكروفون ليتحدث. «كطبيب نفساني، أريد أن أُقدّم تفسيراً. ما رأيتموه هو ما يحصل عندما يتحدث اختصاصي في الفيزياء اللاخطيّة يشتغل على نُظُم شاملة ذات أبعاد محدودة، مع اختصاصي في البيولوجيا اعتاد استخدام أدوات رياضية مُعيّنة. تتمثّل الفكرة الأساسية في أن النُّظُم كلها تتشارك في صفات مُعينة، تظهر عندما تُوضع تلك النُّظُم في أبسط نموذج عنها. إن تلك الفكرة ليست مألوفة في عالم الطب والبيولوجيا. إن أسئلة من نوع «ما هي الأنواع الفرعية من الشيزوفرينيا؟» و«ثمة أربعة نُظُم عضلية في العين، فما هو النموذج الصالح عنها من وجهة نظر الفيزياء» وغيرهما، لا دلالة لها من هذا المنظار.

المسألة هي أننا كعلماء وكأطباء، ندرس خمسين جزءاً من كل شيء. وتبدو بعيدة من أذهاننا فكرة وجود عناصر شاملة ومشتركة للحركة. لقد قدّم لنا برناردو هبرمان أحد تلك النماذج، وكانت النتيجة أننا صُدمنا. وسرعان ما لجأنا إلى رد الفعل». وهنا، تنفس هبرمان الصعداء وأضاف: «لقد حدث مثل ذلك الميل لرفض التصديق بوجود تفسير بسيط للنُّظُم المُعقّدة، في الفيزياء نفسها قبل ٥ سنوات، أما الآن، فقد تبنى الجميع هذه الوجهة».

إن الخيار هو نفسه دائماً. إما أن تجعل نموذجك أكثر تعقيداً، وربما أكثر ولاءً للحقيقة، أو أن تُبسّطه لكي يسهل التعامل معه. لا يصدق سوى أكثر العلماء سذاجة أن النموذج الكامل يُمثّل الحقيقة تمثيلاً تاماً.

فالحق أن مثل ذلك النموذج يملك العيوب نفسها التي تحوزها خريطة كبيرة وتفصيلية عن إحدى المُدُن. خريطة تُظهر كل مرأب وشارع ومبنى وشجرة وزقاق وشخص. إن مثل تلك الخريطة، ببساطة، شيء مستحيل. ولو صنعت مثل تلك الخريطة، لأحبطت الهدف الذي صُنعت من أجله أصلاً، أي القدرة على التعميم واستخلاص الأفكار المجردة.

يعلم صُنّاع الخرائط كيف يُظهرون المعالم التي يبحث عنها الناس. وأيّاً كان هدفها، يجب على الخرائط والنماذج أن تُبسّط الأشياء، وأن تُحاكي أيضاً أحوال العالم فعلياً. وبالنسبة لرالف أبراهام، وهو عالم رياضيات من «سانتا كروز»، إن

النموذج الجيّد هو «العالم المُزهر» الذي فصّله جايمس لوفلوك ولينن مارغولوس، عبر ما يُسمى «فرضية غيّاه».

وتقول تلك الفرضية إن الظروف المناسبة لوجود الحياة على الأرض، صُنعت وحُفظت بواسطة الحياة نفسها بواسطة عملية تُديم نفسها بنفسها عبر نظام ديناميكي من التغذية الراجعة. ويمكن اعتبار «العالم المُزهر» أبسط شكل لـ«فرضية غيّاه»، التي تبدو مبسطة إلى حد قد يعتبره البعض غبياً. ويصف أبراهام ذلك النموذج بأنه: «ثلاثة أشياء تحدث معاً: الأزهار البيض وصنوها السود والصحراء القاحلة. ثمة ثلاثة ألوان: الأبيض والأسود والأحمر. كيف يمكن تلك الأشياء أن تُعلّمنا عن الكوكب الذي نعيش عليه؟ إنها تشرح كيفية ظهور التعديل الحراري. وتفسّر لماذا تصلح الحرارة على كوكب الأرض لاستضافة الحياة عليه. إن نموذج «العالم المُزهر» مُزرٍ، لكنه يُعلمنا كيف ظهر التوازن البيولوجي الحيوي على الكوكب الأزرق».

تعكس الأزهار البيض الضوء، فتجعل الكوكب مُلوّناً. وتمتص السود الضوء، فتخفّف من الانعكاس وتحتفظ بالدفء اللازم لاستمرارية الحياة. وفي المقابل، «ترغب» الأزهار البيض في الجو الدافئ، بمعنى أنها تتكاثر كلما ارتفعت الحرارة. وتميل الأزهار السود إلى البرودة. ويمكن التعبير عن تلك الأمور بواسطة مجموعة من المُعادلات التفاضلية، لذا يمكن رسم «العالم المُزهر» على الكومبيوتر. ومع وجود تنوّع كبير في مُعطيات الظروف الأولية، يظهر جاذب للتوازن، ولكنه ليس بالضرورة ساكناً.

ويتحدّث أبراهام عن رأيه في نموذج «العالم المُزهر». ويرى فيه: «مجرد نموذج رياضي للتعبير عن نموذج فكري. وذلك ما نسعى اليه، أي نموذج يتوافق مع النماذج البيولوجية أو الاجتماعية.

تبدأ من الضوء والانعكاس، ثم تُضيف بعض النباتات، ثم تراقب عملية التطور عبر مرور بلايين السنين افتراضياً على الكومبيوتر. ثم تُدرس الأطفال كيف يكونون أعضاء صالحين لإدارة هذا العالم».

وبالنسبة إلى جمع غفير من العلماء، يعتبر الجسد البشري أكثر النُّظُم الديناميكية تعقيداً، بل المثال الأعلى للنُّظُم المُعقّدة. ولا توجد أي مادة تدرسها الفيزياء بإمكانها أن تُدانيه، ولو بصورة كاريكاتورية. لا شيء يُشبه هذا التجمع الهائل من الإيقاعات الداخلية العكسية التي تسير عبر المقاييس الكبيرة والدقيقة في آن واحد، كما يظهر في حركة العضلاتُ، والسوائل، والتيارات الكهربائية، والألياف، والخلايا. لا يوجد نظام فيزيائي أُخضع لمثل تلك الاختزالية الصارمة: فلكل عضو تركيبه الميكروسكوبي الدقيق الخاص به، كما له كيمياؤه الخاصة أيضاً، بحيث يُمضي طُلاب علم وظائف الأعضاء سنيناً لحفظ أسماء تلك الأجزاء.

ومع ذلك، يصعب فهم تلك الأجزاء أيضاً! وفي مثال ملموس، يمكن لعضو في الجسم أن يكون مُحدداً بدقة كحال الكبد. كما باستطاعته أن يكون شبكة مُعقّدة من الأشياء الصلبة والسائلة مثل الجهاز الدوري. وكذلك فلربما كان شيئاً غير مرئي، كنوع من التجريد الذهني، مثل «جهاز المناعة» الذي يحتوي على كريات لمفاوية وخلايا ناقلة من نوع «تي ٤» وخلايا تعمل على كتابة شيفرة للتعرف على أنسجة الجسم البشري وأعضائه بحيث تميّزه عن الأشياء الدخيلة عليه مثل البكتيريا والفيروسات.

ولدرس تلك النُّظُم، لا بدّ من معرفة تفاصيل تركيبتها تشريحياً وكيماوياً. ولذا، يدرس اختصاصيو القلب تفاصيل انتقال الإيون (أي الذرة التي تحمل شحنة كهربائية) عبر عضلات القلب. ويدرس اختصاصيو الدماغ تفاصيل انتقال الاشارات الكهربائية عبر الأعصاب. ويدرس اختصاصيو العين أسماء عضلات العين وحركاتها. وفي ثمانينات القرن العشرين، ولّدت نظرية الكايوس نوعاً جديداً من الفيزيولوجيا، تتمحور حول فكرة أن المُعادلات الرياضية في إمكانها أن تساعد العلماء على فهم أكثر شمولاً للنُّظُم المُعقّدة، بغض النظر عن تفاصيلها! وأتقن البحّاثة، على نحو متزايد، التعامل مع الجسد باعتباره ساحة للحركة والتذبذب. كما طوّروا وسائل لتتبع تلك الايقاعات وفهمها.

وعثروا على إيقاعات لا يمكن رؤيتها بعدسات الميكروسكوب وشرائحه، ولا بتحليل

عينات الدم. ودرسوا أمراض الجهاز التنفسي في ضوء الكايوس. وتقصّوا عمليات التغذية الراجعة التي تتحكم في كريات الدم ونشاطاتها وعددها. وفكّر اختصاصيو السرطان في دورة الحياة عند خلايا الورم الخبيث، بإيقاعاتها الدورية المنتظمة والفوضوية. ودرس الأطباء النفسانيون المقترب المتعدد الأبعاد عند استخدام الأدوية في علاج الأمُراض النفسية. ولكن المفاجأة الكبرى جاءت من القلب، وقد سيطرت إيقاعاته، بتقلباتها وانتظامها وتشوشها، على علم فيزيولوجيا الكايوس.

لم يتورع عالم مثل ديفيد ريبال عن الدخول إلى عالم الكايوس في القلب، مبتعداً عن المقتربات المُكرّسة علمياً. ووصف القلب بأنه «النظام الديناميكي الذي يمثل مصلحة حيوية لكل منا.

تتبع نبضات القلب إيقاعاً دورياً منتظماً. وعندما يصل الإيقاع إلى نمط غير دوري، كالحال في ارتجاف عضلة القلب، ينشأ حال مستقر يقود إلى الموت. ويبدو أن دراسات الكومبيوتر باستطاعتها أن تُعطي فوائد طبية جمّة، بالاعتماد على نموذج رياضي يُماثل القلب فعلياً، بحيث يستطيع إنتاج الإيقاعات المختلفة التي تنتجها ديناميكياته».

التقطت فرق علمية من الولايات المتحدة وكندا خيط التحدي. لقد عرف العلماء منذ وقت طويل السلوكيات غير المنتظمة في إيقاع دقات القلب، ووصفوها وصنّفوها. وتستطيع الأذن المُدرّبة التقاط عشرات من الايقاعات المختلفة. وتقدر العين المُدرّبة أن تلتقط عشرات الأنماط المضطربة من رسوم تخطيط القلب.

وفي إمكان الإنسان العادي أن يُلاحظ أهمية تلك الإيقاعات المُضطربة من الأسماء الرنّانة الكثيرة التي يستعملها الأطباء في توصيف تلك الاضطرابات. ويتحدث الأطباء عن الدقّات الفجائية، وإيقاع التبادل الكهربائي، والانسداد العالي في شبكة الكهرباء التي تُنظم دقات القلب، وعن الإيقاعات الهروبية، والانقباضات الموازية، وإيقاعات ويكنباخ البسيطة والمُعقّدة، وعن تسارع دقات القلب وغيرها. ولعل الإيقاع الأكثر رهبة هو الارتجاف. وتقليدياً، تريح أسماء الإيقاعات الأطباء، لأنها تُعرّفهم على

الحالة التي يواجهونها، كما تتيح تشخيص ما يشكو منه القلب، وتُعطي معلومات عن سير عمله.

وفي المقابل، اكتشف العلماء الذين استعملوا أدوات نظرية الكايوس، أن طب القلب التقليدي توصّل إلى تعميمات خاطئة عن الاضطراب في إيقاع دقات القلب، وسقط في فخ التصْنيف السطحي الذي يُخفي الأسباب الأكثر عمقاً.

واكتشف هؤلاء مفهوم «القلب الديناميكي». وتميّز الباحثون في الكايوس بامتلاكهم خلفيات علمية غير تقليدية. فمثلاً، درس ليون غلاس الفيزياء والكيمياء في جامعة ماكغيل في مونتريال بكندا، حيث نما ميله للاهتمام بالأرقام وبعدم الانتظام. وأعد أطروحة الدكتوراه عن حركة الذرّات في السوائل. ثم التفت إلى مسألة الاضطراب في دقات القلب. ويرى أن الاختصاصيين يُشخّصون نوع الاضطراب في إيقاع الدقّات عبر تأمّلهم أقساماً صغيرة من رسوم تخطيط القلب. «يبدو اختصاصي القلب وكأنه يبحث عن أنواع الاضطرابات التي درسها سابقاً. ولا يُحلّل بالتفصيل الديناميكية المرتبطة بتلك الإيقاعات غير المنتظمة، على رغم غناها بالتفاصيل علمياً، وبأكثر مما يتخيّله الأطباء».

وفي كلية الطب في جامعة هارفارد، مال آري غولدبيرغر الذي يُشرف على مختبر لإيقاعات القلب المُضطربة في مستشفى «بيث اسرائيل» في بوسطن، للاعتقاد بأن إيقاعات القلب تصلح مساحة للتعاون بين علماء الرياضيات والفيزيائيين وعلماء الفيزيولوجيا. وبحسب رأيه: «نحن بصدد حدود جديدة... نوع جديد من الفينومينولوجيا (علم وصف الظواهر)... عندما نرى تفرّعاً، وتقلّبات مُفاجئة في السلوك، فإن المُعادلات الخطيّة التقليدية لا تعود كافية... يتطلب الأمر نماذج من نوع جديد، ومن الواضح ان الفيزياء لديها ما تقوله عن ذلك».

وعمل غولدبيرغر وأمثاله على تخطي الحواجز التقليدية التي تفصل أنواع العلوم بعضها عن بعض. وظهرت عقبة كأداء، بحسب رأيه، سببها نفور علماء الفيزيولوجيا من الرياضيات. ويصف ذلك قائلاً: «في العام ١٩٨٦، لا ترد كلمة «فراكتال» في أي كتاب

فيزيولوجيا..في العام ١٩٩٦، لا تجد كتاب فيزيولوجيا لا يحتوي على هذه الكلمة!» عندما يصيخ الطبيب السمع إلى دقّات القلب، تصل إلى أُذنيه أصوات تدفق السائل على السائل، وارتطام السائل بالصلب، وارتطام الصلب بالصلب أيضاً. يعبر الدم من غرفة في القلب إلى أُخرى. (يضم القلب أربع غرف). ويُدفع إلى الجسم عبر انقباض العضلة خلفه، وتمدُّد جدران الأوعية أمامه...

تصفق صمّامات القلب عندما تنغلق بإحكام، عندما يعبرها تيار الدم مندفعاً إلى الأمام، فتسد الطريق على عودته إلى الوراء. ويعتمد تقلص عضلة القلب، وهو المُحرِّك للدورة الدموية كلها، على نشاط موجات كهربائية ثلاثية الأبعاد. إن صنع نموذج عن قسم من سلوك القلب يُعجز الكومبيوتر الفائق، أما صنع نموذج عن دورة القلب بأكملها فيبدو أمراً مستحيلاً. إن صنع نموذج كومبيوتر من النوع الذي تستخدمه شركات الطيران لمُحاكاة وضع جناح طائرة في نفق الهواء التجريبي، لهو عمل بعيد المنال بالنسبة لتقنيي الطب.

ومثلاً، تحكم أسلوب التجربة والخطأ في العمل على تصميم صمّامات القلب الاصطناعية، التي باتت شائعة راهناً. وفي مجلات هندسة التصاميم، يُعطى حيِّز خاص للصمّام الطبيعي بتركيبته المرهفة والشفافة التي تتميّز بثلاث قباب تُشبه المظلة الجوية (باراشوت). ولكي يسمح للدم بالمرور إلى دواخل القلب، ينثني الصمّام على نفسه متراجعاً إلى الخلف. وعندما يندفع الدم إلى الأمام، يعود الصمّام إلى وضعه السابق، فيمنع تيار الدم من العودة إلى الوراء. ويجب أن يقفل تماماً، نتيجة الضغط الناجم من تقلّص عضلة القلب، فلا يسمح بأي تسرب. ويُكرّر ذلك بليونين أو ثلاثة بلايين مرة في حياة الإنسان. لم يفلح مهندسو الصمّامات في تقليد هذه الأمور كلها. وعموماً، تبدو صمّاماتهم الاصطناعية وكأنها مستقاة من أعمال الصيانة. ويُعطي النموذج الأكثر شيوعاً لصمّام القلب الذي يوصف بأنه «كرة في قفص»، نموذجاً من ذلك. وما زال التسرّب وعدم القدرة على التوافق مع حالات الشدّة البدنية والنفسية، مشكلات صعبة الحل.

وثمة مسائل أكثر صعوبة. فعندما يتغيّر نمط تدفق الدم في القلب، تتولّد مناطق من الاضطراب حول الصمّامات الاصطناعية، إضافة إلى مناطق من الركود.

وعندما يركد الدم، يتخثّر، فتتكوّن التجلّطات. ولاحقاً، تتكسّر التجلّطات المتخثِّرة، فتنتقل أجزاء منها لتصيب الدماغ، مثلاً، فتحدث السكتة الدماغية، التي تؤدي إلى الشلل أو ربما الموت. وبات التخثّر مُشكلة كبرى في صناعة الصمّامات الاصطناعية. ولم يُبتدأ حلّ تلك المُشكلة إلا في منتصف الثمانينات من القرن العشرين، عندما طبّق علماء الرياضيات في «معهد كورانت» في جامعة نيويورك، تقنيات جديدة في صنع نموذج عن تلك المشكلة. واستطاع ذلك النموذج تقديم الحلّ المنشود. لقد صنعت كومبيوتراتهم نماذج لمُحاكاة ضربات القلب.

أعطت النماذج صوراً ثنائية الأبعاد، لكنها تُظهر عمل القلب بطريقة حيوية. وارتسمت على الشاشات مئات من النقاط التي تُحاكي التسرّب من تيار الدم، كما جرت مُراقبة التمدّد في جدران القلب وتكوّن الدوّامات أثناء تدفق الدم عبر الصمّام. ووجد علماء الرياضيات أن القلب يُضيف مزيداً من التعقيد على مسائل تدفق السوائل، لأن النموذج عن عمله يجب أن يأخذ الليونة البلاستيكية لجدران القلب في الاعتبار. وبدل المفهوم القديم عن تيار يتدفق عبر سطح صلب، كمرور الهواء فوق جناح الطائرة، تبيّن أن الدم يغيّر في أسطح القلب بطريقة ديناميكية ولا خطّية. وأما مسألة عدم انتظام ضربات القلب، فإنها أكثر رهافة وأشد تعقيداً. يؤدي ارتجاف البطين إلى مئات آلاف الوفيات في الولايات المتحدة وحدها سنوياً.

وفي كثير من تلك الحالات، يأتي الارتجاف من مصدر معلوم: انسداد الشرايين التي تُغذي عضلة القلب نفسها، مما يؤدي إلى ذوائها تدريجاً. ويساهم الكوكايين والتوتر العصبي والبرد في تعريض الإنسان للاصابة بالارتجاف. وفي حالات جمّة، لا يُعرف السبب الذي يُطلق عملية الارتجاف. وفي العادة يبحث الأطباء عن التلف الذي قد يدل إلى السبب. وقد يُصاب مريض قلبه مُعافى ظاهرياً، بنوبة قاتلة، ربما أكثر من غيره. ثمة

تشبيه سائد عن الارتجاف: كيس من الديدان. فبدل أن ينقبض القلب ويسترخي، بطريقة تكرارية ودورية، تهتز أنسجة عضلة القلب في حراك غير مُنسق، فلا يقدر على الانقباض لدفع الدم إلى الجسم وتدويره.

وفي القلب المُعافى، تنتقل الإشارة الكهربائية في موجات مُنسّقة عبر التركيب الثلاثي الأبعاد للقلب. وعندما تصل الإشارة الكهربائية إلى الخلية في عضلة القلب، فإنها تنقبض. ثم تسترخي فترة مُعينة، تكون خلالها غير قابلة للاستجابة لأي إشارة كهربائية. وفي حال الارتجاف، تتكسر الموجة الكهربائية. فتنقبض خلية عضلية هنا، وتتأخر تلك، ولا تستجيب ثالثة، فلا يصل القلب إلى وضع الانقباض القوي الذي يمكنه من دفع الدم إلى أوعية الجهاز الدوري. فتتوقف الدورة الدموية. وفي حال الارتجاف، لا يكون القلب كله منقبضاً ولا مسترخياً. والأمر الذي كثيراً ما حيّر العلماء، هو أن بعض أقسام القلب تبدو مُعافاة بحيث تعمل طبيعياً.

وكثيراً ما يستمر المصدر الرئيسي للإشارات الكهربائية بإرسال التيار إلى عضلة القلب، في نبضات منتظمة. وتستجيب خلايا عضلية بصورة طيبة.

وإذ تتلقى الخلية إشارة كهربائية مناسبة، فتنقبض، ثم تسترخي بانتظار الإشارة التالية. ويُظهر كثير من القلوب، عند التشريح بعد الوفاة، حالاً شبه طبيعية. ولذا، يعتقد علماء نظرية الفوضى بأن هذا الأمر تحديداً يفرض تجديد النظرة إلى ظاهرة الارتجاف: الأجزاء المُكوّنة للقلب المرتجف تعمل، لكن المجموع الكليّ يذهب هباء. يُشكّل الارتجاف اضطراباً في نظام مُعقّد، تماماً مثلما يُجسد الاضطراب النفسي ـ العقلي عدم انتظام في نظام مُعقّد.

ولا يتوقف القلب عن الارتجاف تلقائياً. إن هذا النوع من الكايوس ميّال للثبات. وبفضل صعقة كهربائية خارجية، التي تشبه هزّة كبيرة في النظام الديناميكي، يعود القلب إلى حال الاستقرار. وتُعطى تلك الصعقة عبر جهاز اسمه «مزيل الارتجاف». وبشكل عام، تبدو تلك الأجهزة فاعلة. لكن صنعها اقتضى المرور بالكثير من الخطأ والصواب،

كحال الصمّامات الاصطناعية. ويشرح عالم البيولوجيا النظرية آرثر وينفري الأمر: «يجرى التوصّل إلى تحديد حجم الصعقة وشكلها بصورة تجريبية. لا يوجد أي إطار نظري لهذا العمل. ويتبيّن الآن أن مجموعة من الافتراضات كانت خاطئة. ومن المستطاع إعادة تصميم «مزيل الارتجاف» لزيادة كفايتها بأضعاف، مما يعني رفع فرص النجاح بإزالة الارتجاف أضعافاً». وبالنسبة إلى الأنواع الأُخرى من الاضطراب في إيقاع القلب، يتوافر الكثير من الأدوية التي اشتق مُعظمها بطريقة الخطأ والصواب. ومن دون فهم نظري سديد عن ديناميكيات القلب، يصعب التنبؤ بأثر أدوية علاج الاضطراب في انتظام دقات القلب. ويصف وينفري الوضع الراهن بالكلمات التالية: «لقد بُذل جهد كبير، خلال العقدين الأخيرين، لتقصي تفاصيل عمل أغشية الأنسجة المختلفة في القلب. وتراكم كمّ هائل من المعرفة عن العمل التفصيلي الدقيق لأقسام القلب ومكوّناته. تلك أمور هائلة الأهمية. يبقى من المهم أيضاً، التوصّل إلى نظرة شاملة عن تلك المعرفة المتراكمة». ترعرع وينفري في أُسرة لم يذهب أيٌ من أفرادها إلى الجامعة. واستهل حياته بعدم تلقي تعليم مناسب! وشُغل أبوه برفع نفسه من الصفوف الدنيا في صناعة التأمين، للوصول إلى مركز نائب الرئيس. فتنقلت العائلة معه سنوياً على طول الساحل الشرقي.

وقصد وينفري ما يزيد على عشر مدارس قبل إنهائه المرحلة الثانوية. وتكوّن لديه إحساس أن الأشياء المهمة فعلياً تتصل بالرياضيات والبيولوجيا، مع ملاحظة أن ما من أمر يجمع بين الموضوعين بطريقة مُرضية. ولذا، قرّر ألا يتّبع طريقاً تقليدياً في التحصيل العلمي. ودرس الفيزياء الهندسية لمدة ٥ سنوات في جامعة كورنيل، فدرس الرياضيات التطبيقية بتوسع، إضافة إلى أساليب استعمالها بصورة تجريبية. واستعداداً لانتقاله للعمل مع المُجمَّع الصناعي ـ العسكري، نال درجة دكتوراه في البيولوجيا، مُحاولاً الجمع بين النظرية والتطبيق بأساليب جديدة. واستهل حياته المهنية في جامعة جون هوبكنز، التي غادرها بسرعة بسبب خلافاته مع الكلية فيها.

ثم انتقل إلى جامعة برنستون، التي غادرها بسرعة بسبب خلافاته مع الكلية فيها، ثم

حاز إجازة أكاديمية بواسطة الدراسة من بُعد في جامعة برنستون، إبان عمله مُدرّساً في جامعة شيكاغو. جسّد وينفري نوعاً جديداً من المفكرين في عالم البيولوجيا. فمارس أساليب العمل الهندسي أثناء قيامه بتجارب الفيزيولوجيا. وشرع في دراسة النُّظُم الديناميكية في البيولوجيا، في سبعينات القرن العشرين، عبر دراسة الساعات البيولوجيّة، وخصوصاً ما يُسمى «الإيقاع المتناوب لليل والنهار». ويعني ذلك دراسة التغييرات في عمل وظائف الجسم، مع الانتقال من الليل إلى النهار. ويتضمن ظواهر مثل النوم والاستعداد للعمل والتمثّل الغذائي والهرمونات وغيرها. وقبله، ساد تفكير تطوري، ينسب الفرق بين حالي الليل والنهار في جسم الانسان إلى عنصر تطوري، إذ يلاحظ إيقاعاً مماثلاً في الحيوانات.

وأخضع وينفري الإيقاع المتناوب إلى منطق الدراسات الرياضية. وبحسب كلماته: «تملكني إحساس بأن هذا الايقاع ينتمي إلى الديناميكيات اللاخطيّة. ولم يُقدّم أحد مفهوماً عن آليات الساعات البيولوجية. وبذا، أصبحت في مواجهة خيارين. إما الانتظار حتى يخرج أحد اختصاصيي البيولوجيا الكيماوية بتفسير مناسب، ثم استخلاص علاقته مع إحدى الآليات المعروفة، أو النظر إلى الساعات البيولوجية عبر نظرية النُّظُم المُعقّدة والديناميكيات اللاخطية. واتجهت فوراً إلى الخيار الثاني».

وذات مرّة، ملأ مختبره بأقفاص تحوي ناموساً، الحشرة التي يتناغم نشاطها مع إيقاع الليل والنهار بصورة نموذجية. وفي المختبر، ومع الحرارة المستمرة والإضاءة الدائمة، اتضح أن الناموس يمتلك ساعة داخلية مقدارها ليس ٢٤ ساعة، بل ٢٣ ساعة.

وفي كل دورة، تنطلق في نشاط محموم. وتبيّن أنها تبقى منتظمة على إيقاع الليل والنهار، في الأوضاع الطبيعية، لأن ضوء الشمس يعيد ترتيب الساعة البيولوجية! وألقى وينفري ضوءاً اصطناعياً على ناموسه، بجرعات مدروسة.

وعملت تلك الجرعات إما على تقديم موعد الدورة المقبلة من الإيقاع أو تأخيرها. ووضع رسماً بيانياً للربط بين أثر تلك الجرعات وتوقيتها. بعدها، وبدل الانغماس في

تخمين طبيعة التبدّلات الكيماوية في الناموس، نظر إلى المسألة برمتها من منظار الهندسة اللاكمية (الطوبولوجيا)، بمعنى أنه نظر إلى الشكل النوعي للمعلومات وليس إلى تفاصيلها الكميّة.

وتوصّل إلى استنتاج مُذهل: ثمة تفرّد في تلك الهندسة. لقد ظهرت نقطة مختلفة عن كل ما عَداها. وبتأمل ذلك التفرّد، توقع وجود نوع خاص، أي توقيت مُحدد، لدفقة الضوء في إمكانها أن تكسر الساعة البيولوجية عند الناموس، أو أي ساعة بيولوجية أُخرى. كان توقّعاً مُدهشاً، ولكن تجارب وينفري أكّدته. «تذهب إلى الناموس في منتصف الليل، وتسلط عليه كمية مُحدّدة من فوتونات الضوء (الفوتون هو وحدة الطاقة في الضوء)، فتتوقف ساعته البيولوجية عن العمل. ويغدو أرِقاً بعدها. ويصبح نشاطه متقطعاً وعشوائياً. ويستمر في ذلك السلوك النعس طالما كرّرت كسر ساعته البيولوجية. يشبه ذلك ما يحدث عند البشر عند تنقلهم بسرعة بين مناطق جغرافية مختلفة. ويُسمى «أثر الطيران النفّاث».

في مطلع سبعينات القرن العشرين، أثارت نظرية وينفري عن الساعة البيولوجية اهتماماً مُذهلاً. وكان من الصعب تكرار ذلك الأسلوب مع كائنات أُخرى.

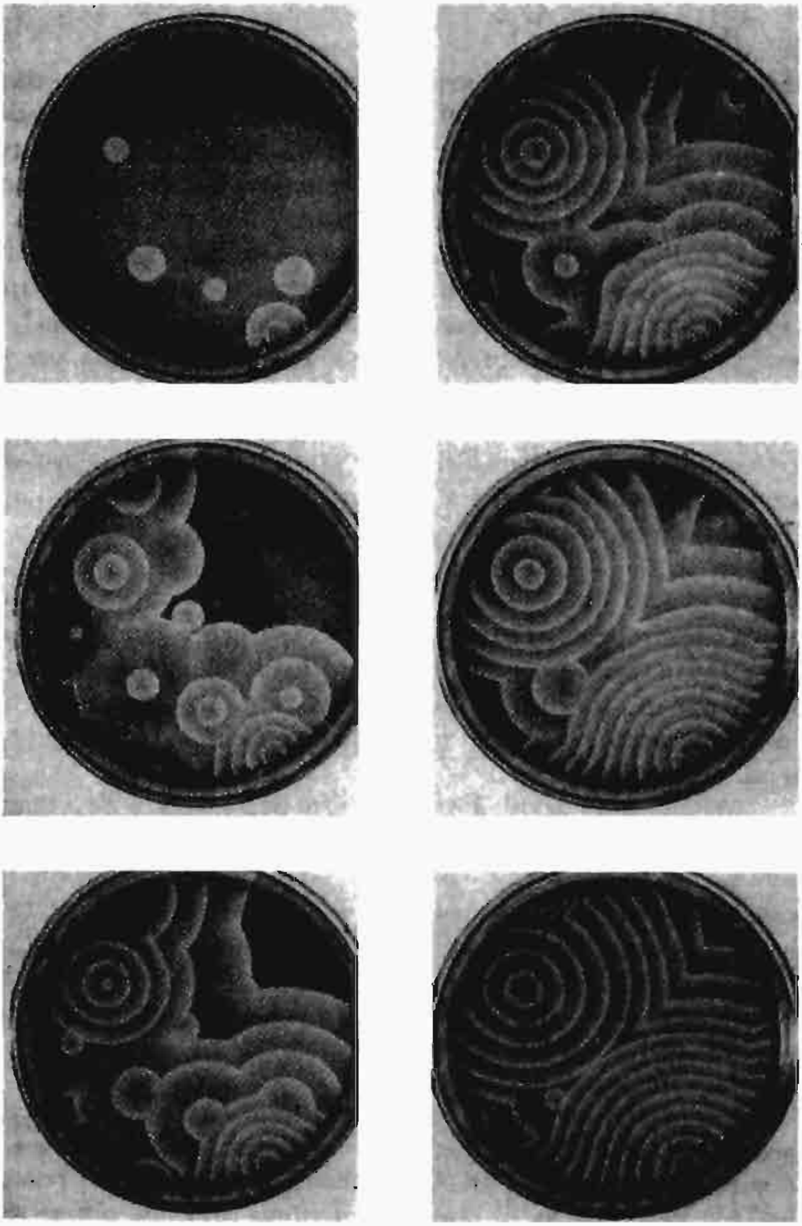
يبقى الأرق و«أثر الطيران النفّاث» على رأس قائمة الظواهر غير المُفسّرة بيولوجياً. ويستدرج كلاهما حلولاً من أسوأ الأنواع، بداية بالحبوب المنومة ووصولاً إلى الوصفات السرية. وقد جمع الباحثون أكواماً من المعلومات مستقاة من العمل مع مجموعات بشرية، وخصوصاً الطلاب أو كبار السن أو بعض كُتاب المسرحيات الذين يتفرغون لإنهائها ولا يمانعون في الحصول على بضع مئات من الدولارات لقاء أسبوع من العيش «في عزلة من الوقت»: أي السكن في غرفة لا تتعرض لضوء الشمس ولا تتغيّر الحرارة فيها، ولا تتوافر فيها ساعات ولا تلفونات. يملك البشر دورة من اليقظة والنوم، تترافق مع دورة من الحرارة الجسدية أيضاً، وتخضع الدورتان كلتاهما إلى نسق من التذبذب اللاخطيّ، بحيث تُصحّح نفسها بعد التعرض لاضطراب هيّن. وفي العُزلة، من

دون إعادة ضبط الساعة البيولوجية يومياً، تنكسر دورة الحرارة أيضاً، وهي التي تمتد طبيعياً على مدار ٢٤ ساعة، بحيث تكون أدنى أثناء الليل. وبرهنت بعض التجارب التي أُجريت في ألمانيا، أنه بعد بضعة أسابيع من اضطراب النوم، تنفصل دورة الحرارة عن الساعة البيولوجية، فتصبح عشوائية. يظل بعض الناس يقظين لمدة عشرين أو ثلاثين ساعة متواصلة، تليها عشر أو عشرون ساعة من النوم. وفي تلك التجارب، لم يلاحظ الناس أن نهارهم أصبح أكثر طولاً، بل إنهم لم يتقبلوا تلك الفكرة حين أُخبروا عنها. وفي منتصف ثمانينات القرن العشرين، شرع بعض الباحثين في تطبيق أسلوب وينفري المنهجي على البشر.

وجاءت التجربة الأولى من حال امرأة بلغ بها الأرق حد قضاء الليل في أعمال الحياكة بالصنارة، أمام واجهات المصارف المنيرة. لقد تغيّرت دورة الليل والنهار عندها كلياً. ومع ذلك، أوردت أنها تشعر بالراحة.

وفي ذلك الحين، انتقل وينفري للعمل على إيقاعات القلب. عملياً، لم يكن ليقول إنه «انتقل». فبالنسبة إليه، بقي الموضوع نفسه. وعلى الرغم من تغيّر الكيمياء، بقيت الديناميكيات عينها. وقد نما اهتمامه بالقلب بعد أن شهد مصرع قريب له بأثر من نوبة قلبية، ووفاة شخص كان يسبح قربه. لماذا يبقى القلب على إيقاع منتظم طوال الحياة، وينجز أكثر من بليوني دورة متصلة، عبر مزيج من الانقباض والاسترخاء، والتسارع والتباطؤ. ثم فجأة ينفلت الإيقاع من انتظامه في نوبة جنونية قاتلة؟

تحدث وينفري عن باحث اسمه جورج ماينز، بلغ سن الثامنة والعشرين في العام ١٩١٤. وفي مختبره في جامعة ماكغيل في مدينة مونتريال الكندية، صنع ماينز آلة صغيرة تقدر على بث نبضات كهربائية منتظمة إلى القلب. «عندما قرّر ماينز الانتقال إلى دراسة القلب، اختار التجربة الأقرب إليه: قلبه بالذات. وعند الساعة السادسة من ذلك المساء، قصد البواب المختبر بعد أن لاحظ أن هدوءاً غير عادي يسوده. ووجد ماينز ملقىً على الأرض، محاطاً بأدوات كهربائية مبعثرة. وظهرت أداة مكسورة قرب صدره عند موضع



الكايوس الكيماوي: تنتقل الموجات إلى الخارج في دوائر متراكبة، وحتى في موجات لولبية، حيث تظهر علامات الكايوس في أحد أكثر التجارب الكيماوية شيوعاً: تفاعل بليزوف ـ زابوتنسكي. ولوحظت أنماط مماثلة في أطباق المختبر التي تحتوي على طفيليات الأميبا. وفكّر ارثر وينفري أن تلك الموجات تُشبه موجات الكهرباء التي تمشط عضلات القلب، سواء بانتظام أو بصورة عشوائية.

القلب، ومتصلة إلى جهاز لتسجيل دقات القلب. وتوفيماينز». قد يذهب الظن بالبعض إلى الاعتقاد بأن إرسال نبضات كهربائية منتظمة من الخارج إلى القلب، يُحدث اضطراباً في إيقاعه الداخلي. ويمكن الصدمات الكهربائية أن تُقدّم أو تؤخر الدقة التالية، تماماً كحال الايقاع المتناوب لليل والنهار. ولكن ثمة فرقاً بين القلوب والساعات البيولوجية، وهو فرق لا يجرؤ حتى أشد النماذج بساطة على تجاهله: إن للقلب شكلاً يملأ حيزاً في الفضاء. يمكنك ان تحمله بيدك. ويمكنك أن تتابع الموجة الكهربائية التي تمرّ فيه عبر أبعاد ثلاثية. ويتطلب إنجاز تلك الأمور حذقاً ومهارة.

لقد قرأ رايموند ايدكير من كلية الطب في «جامعة ديوك» مقالاً لوينفري نشرته مجلة «ساينتفيك أميركان» في العام ١٩٨٣، سجّل فيه أربعة توقّعات بخصوص إثارة الارتجاف وإيقافه، بناء على الديناميكيات اللاخطيّة والهندسة اللاكميّة. ولم يصدق ايدكير تلك التوقّعات كثيراً، إذ بدت أقرب إلى التأملات. وكاختصاصي في القلب، رأى أنها أكثر ميلاً إلى الطابع التجريدي. وخلال السنوات الثلاث التالية، وُضعت تلك التوقّعات على المحك، وأثبتت صحتها. ولذا، نهض ايدكير بأمر برنامج لجمع المزيد من المعلومات عن المقترب الديناميكي للقلب.

لا يُعطي التخطيط الكهربائي للقلب سوى معلومات مسجلة في بُعد وحيد. وخلال العمليات الجراحية، يستطيع الجراح نقل الأقطاب الكهربائية التي تستخدم في رسم تخطيط للقلب، من موضع إلى آخر، مما يؤدي إلى جمع معلومات عن عشرات المواضع فيه، خلال فترة لا تزيد على عشر دقائق، وهذا ما يولّد صورة مُركّبة. وخلال الارتجاف، يتغير القلب ويرتعش بسرعة كبيرة. ولذا، طوّر ايدكير تقنية تعتمد على الكومبيوتر، بحيث جمع ١٢٨ قطباً كهربائياً لتوضع حول القلب، أثناء الجراحة، فتحيط به إحاطة السوار بالمعصم. وتُسجّل الأقطاب كل الموجات الكهربائية التي تعبر القلب، وتنقلها إلى الكومبيوتر الذي يصنع خريطة للقلب. وبهذه التقنية، سعى ايدكير إلى تطوير الأدوات الكهربائية التي تُستعمل لوقف الارتجاف. وكثيراً ما تحتوي غرف الطوارئ، على

«مزيلات الارتجاف» التي يستعملها الأطباء لإرسال صدمة كهربائية مباشرة إلى القلب عبر القفص الصدري. وفي المقابل، طوّر بعض الاختصاصيين مزيلاً للارتجاف يمكن وضعه داخل التجويف الصدري، إذا اقتضت الضرورة. ويبقى ذلك الجهاز، الذي لا يزيد على حجم بطارية صغيرة، جاهزاً للتدخل إذا تكرر حدوث الارتجاف. وفكر ايدكير في ضرورة صنع مزيل للارتجاف بصورة أكثر علمية، وفي الاعتماد على الفهم الفيزيائي للنظام الدينامِيكي في القلب. لماذا قد تنطبق قوانين الفوضى على القلب، خصوصاً مع تركيبته الفريدة من أنسجة متداخلة تنقل الذرات المشحونة بالكهرباء لمواد مثل الكالسيوم والصوديوم والبوتاسيوم؟

كان ذلك هو السؤال الذي أرّق العلماء في جامعة «ماكغيل» و«معهد ماساشوستس للتقنية».

نهض ليون غلاس وزميلاه ميتشل غيفارا وألفن شرايير، بأمر بحث سيصبح الأكثر شهرة تاريخياً بين بحوث الديناميكا اللاخطيّة. واستعملوا مجموعات صغيرة من الخلايا أُخِذَت من قلوب أجنة دجاج يبلغ عمرها سبعة أيام. لم يتجاوز قطر المجموعة المفردة من كتلة الخلايا ١ / ٢٠٠ من الإنش. ووضعت المجموعات في أحد أطباق المختبر ثم رُجّت معاً. فشرعت تنبض بسرعة معدلها نبضة في الدقيقة، ومن دون وجود مُنظّم خارجي. واستطاع العلماء رؤية النبضات تحت الميكروسكوب. وفي خطوة تالية، أُضيف إيقاع خارجي. فأُدخل سلك كهربائي دقيق إلى الطبق، بحيث يتصل بأحد الخلايا. وأُطلقت شحنة كهربائية صغيرة عبر السلك، لكي تحث الخلايا على النبض بقوة وإيقاع يمكن التحكّم بهما. ونُشرت نتائج هذه التجربة الفريدة من نوعها في مقال مجلة «نايتشر» العلمية عام ١٩٨١.

لُخّصت كالآتي: «إن السلوك الغرائبي الديناميكي الذي لوحظ سابقاً في الدراسات الرياضيّة وتجارب علوم الفيزياء، رُصد أيضاً عند تعرض نُظُم التذبذب البيولوجية إلى اضطرابات دورية». وفي هذه التجربة الفريدة، ظهر التفرّع المتّصل مع تضاعف

الدورات، والذي يتفرع تكراراً كلما تغيّر المُحفّز. ورسمت نتائجها خرائط بوانكاريه والخرائط الدائرية. وتحدث غلاس عنها بالقول: «تترسّخ ايقاعات كثيرة بين المُحفز وإيقاعه من جهة، والسلوك الإيقاعي لخلايا أجنّة الدجاج... وباستعمال الرياضيات اللاخطيّة، بات من المستطاع فهم الإيقاعات المتنوعة وتراتبيتها. وإلى الآن، لم يتضمن تأهيل اختُصاصيي القلب دروساً في الرياضيات، لكن هذا الأمر قد يتبدل مستقبلاً عندما ينظر ذوو الشأن إلى اضطرابات القلب بالطريقة التي انتهجناها».

وفي ذلك الحين، صاغ «معهد ماساشوستس للتقنية» وجامعة هارفارد برنامجاً مشتركاً لعلوم الصحة وتقنياتها، شارك فيه ريتشارد كوهن، وهو اختصاصي في القلب وعالم فيزياء. وفي تجاربه على الكلاب، وجد كوهن مجموعة من أنماط تضاعف الدورات التي تدل إلى السلوك الكايوسي. وباستخدام نماذج الكومبيوتر، اختبر السيناريو الذي يتولّد من تكسّر الموجة الكهربائية وتناثرها. وفي وصفه للنتائج، أفاد كوهن بأنها: «توحي بالنسق الذي وصفه فايينبوم حيث تتحوّل ظاهرة منتظمة، في ظروف معينة، إلى السلوك الفوضوي... يبدو أن عمل القلب يملك الكثير من الملامح المشتركة مع النُّظُم الديناميكية».

وفي تجربة جامعة «ماكغيل»، راجع العلماء المعلومات المتراكمة سابقاً عن الأنواع المختلفة من الاضطراب في إيقاع دقات القلب. وفي أحدها، تتداخل ضربات إضافية وغير طبيعية ومُفاجئة مع الإيقاع الطبيعي للقلب. وتفحّص غلاس ورفاقه هذا النوع، وأحصوا عدد الدقات الطبيعية بين دقتين مُفاجئتين. وعند بعض الأشخاص، يتقلّب ذلك الرقم، لكنه يظهر دائماً كعدد إفرادي: ٣ أو ٥ أو ٧ أو غيرها. وعند البعض الآخر، يندرج الرقم ضمن نسق مثل ٢-٥-٨-...١١.

ورأى غلاس أن: «الاختصاصيين رصدوا تلك الأرقام، لكن الآليات التي تصنعها ليست مفهومة تماماً. وغالباً ما يظهر نوع من الانتظام في تلك الأرقام التي تدل على السلوك المضطرب للقلب، ولكن هناك الكثير من عدم الانتظام أيضاً. إنه نموذج عن أحد الشعارات الشائعة: النظام في الكايوس».

وتقليدياً، سارت الأفكار عن الارتجاف في خطين. فقد ظُنّ تقليدياً أن مركزاً ثانوياً (أو أكثر) لبث الإشارات الكهربائية يتكوّن تلقائياً في عضلة القلب نفسها، فيتداخل عمله مع المركز الرئيسي والطبيعي لبث تلك الإشارات. وأعطى عمل علماء جامعة «ماكغيل» بعض التأييد لهذه الفكرة، بإظهاره أن مجموعة كبيرة من أنماط السلوك الديناميكي المضطرب قد تظهرُ بأثر من التضارب بين عمل المُحفّزين الخارجي والذاتي. ولكن ذلك لا يحمل إجابة شافية عن سبب ظهور تلك المراكز الثانوية أصلاً.

وتمثّل الخط الثاني من التفكير بالتركيز على طريقة انتشار الموجات الكهربائية عبر جغرافيا القلب، وليس على مصدرها. بقي العاملون في برنامج «معهد ماساشوستس للتقنية» وجامعة هارفارد، أُمناء لهذا النهج. ورصدوا أشكالاً غير طبيعية لتلك الموجات، بما في ذلك تدويمها في دوائر مُحكمة، ما يولّد ميلها لـ«الدخول ثانية» بمعنى ظهور بعض المناطق التي تصنع إيقاعاً خاصاً، ما يمنع القلب من الاسترخاء الضروري لمعاودته العمل بانتظام.

وبالتشديد على استعمال مناهج الفيزياء اللاخطيّة، توصل علماء كلتا التجربتين إلى إدراك أن تغييراً هيّناً في أحد المتغيّرات، مثل توقيت النبضة الكهربائية أو التبدُّل في سرعة وصولها، في إمكانه أن يُطيح بالنظام الطبيعي لعمل القلب دافعاً إياه عبر تفرع يقود إلى سلوك مختلف نوعياً. وشرعوا في تلمس ملامح مشتركة لمشاكل القلب في عمومها، فربطوا بين أنواع منها، بعد طول الظن بأنها مُتباعدة.

وإضافة إلى ذلك، مال وينفري للاعتقاد بأن المدرستين كلتيهما محقتان، رغم بؤرتهما المختلفة في التفكير. فقد قاده التفكير في تلك المشكلة عبر الهندسة اللاكميّة، للقول إن الرؤيتين ربما كانتا شيئاً واحداً. ورأى أن: «غالباً ما تسير النُّظُم الديناميكية بعكس الانطباع البديهي. ولا يمثّل القلب استثناء من تلك القاعدة». وعقد اختصاصيو القلب الآمال على التوصل لطريقة علمية تُمكّن من التعرّف إلى المرشحين للإصابة بالارتجاف لاحقاً، ولصنع أجهزة أكثر فاعلية لإزالة الارتجاف، ولتركيب أدوية أشد فاعلية. فيما أمل

وينفري بأن يُغذي المقترب الرياضي الشامل حقلاً جديداً في العلم: البيولوجيا النظرية.

يتحدث بعض اختصاصيي الفيزيولوجيا راهناً عن الأمراض الديناميكية؛ تلك التي تظهر في فوضى النُّظُم، وفي تفكك التنسيق أو السيطرة. ويصوغ أحدهم تلك الرؤية بالقول: «إن النُّظُم التي تنبض بالذبذبات طبيعياً، ربما تتوقف عن ذلك، أو تشرع في التذبذب بطريقة جديدة وبأسلوب غير متوقع؛ وكذلك أن تشرع النُّظُم الثابتة في التذبذب أيضاً». وتضم تلك الظواهر اضطرابات التنفس مثل اللهاث والتنهد وانقطاع التنفس المُفاجئ عند الرُضّع (المتصل مع ظاهرة الموت المفاجئ لحديثي الولادة) والتنفس السطحي المتناوب مع التوقف الدوري، الذي يشتهر باسم «أنفاس كاين-ستوكس». ثمة اضطرابات ديناميكية في الدم، مثل سرطان الكريات البيض حيث يختل التوازن بين الكريات البيض والحمر واللويحات الدموية والكريات اللمفاوية. ويعتقد بعض العلماء بأن مرضاً مثل الفُصام (شيزوفرينيا) ربما انتمى إلى هذا النوع أيضاً، إضافة إلى بعض أنواع الكآبة.

وفي المقابل، شرع بعض علماء الفيزيولوجيا في الحديث عن الفوضى كحال لصحة الإنسان. لقد عُرِف طويلاً أن عمليات التغذية الراجعة تتبع مساراً لا خطيّاً، مما يُعزز قدرتها على التحكّم والسيطرة. ولتبسيط الموضوع، يمكن القول إن العملية الخطّية تميل إلى الخروج عن مسارها المألوف قليلاً، إذا تلقت صدمة خفيفة؛ فيما تنحو نظيرتها اللاخطيّة للعودة إلى استقرارها السابق على الصدمة. وفي القرن السابع عشر، عثر كريستيان هيغنز، عالم فيزياء دنماركي ساهم في ابتكار الساعة ذات الرقّاص وعلم الديناميكا التقليدية، على ما نُظِر اليه دوماً كمثال عن التنظيم عبر التغذية الراجعة. فذات يوم، راقب هيغنز مجموعة من الساعات ذات الرقّاص، المرتصفة على حائط خشبي.

وبعد فترة، بدا أن رقّاص الساعة يتأرجح بتناغم وانتظام. ولكن هيغنز يعلم جيداً أن الساعات لا تكون على ذلك المقدار العالي من الدقة. ولم يوفّر له علم الرياضيات ما يُفسّر

انتشار كل هذا الانتظام. وخمّن هيغنز، مُحقاً، أن الساعات تُنسق بواسطة الاهتزازات التي تنتقل عبر الحائط الخشب.

إن هذه الظاهرة، حيث تُثبّت دورة منتظمة دورة أُخرى، تسمّى راهناً «تثبيت الصيغة». وتُستعمل لشرح سبب بقاء وجه القمر عينه في مواجهة الأرض دوماً، وكذلك لتفسير الميل العام عند الأجرام التابعة للدوران حول نفسها بنسب تعبّر عنها الأرقام الصحيحة، مقارنة مع المدّة الزمنية لمدارها. وكلما اقتربت النسبة من رقم صحيح، عملت اللاخطيّة على تثبيته كصيغة معتمدة.

وتنتشر ظاهرة «تثبيت الصيغة» في عالم الإلكترونيات، مما يجعل جهاز التلقي في الراديو ميّالاً للثبات على موجة معينة، على رغم التقلّبات البسيطة فيها. ويُفسر «تثبيت الصيغة» قدرة مجموعة من أجهزة صنع الذبذبات، وضمنها الأنواع البيولوجية مثل القلب والخلايا العصبية، على العمل بتزامن دقيق. وتُعطي الفراشات المُضيئة الشرق آسيوية مثالاً مُبهراً. إذ تتجمع آلاف منها، في وقت التزاوج، وتنتشر في مجموعات كبيرة على الأشجار، فتُضيء وتنطفئ بشكل متواقت، ما يعطي مشهدية آسرة.

ومع تلك الظواهر في السيطرة، تُصبح مسألة الثبات أساسية، بمعنى قدرة النظام على امتصاص الانحرافات البسيطة والصدمات الهينة. وعلى نحو مُشابه، تشكّل المطواعية مسألة محورية في النُّظُم البيولوجية؛ بمعنى قدرة النظام على العمل عبر مجموعة من التردّدات المتنوعة. فقد يؤدي «تثبيت الصيغة» إلى نوع من الجمود ما يحرم النظام من القدرة على التغيير. إذ يُفترض بالكائن الحي أن يتجاوب مع الظروف حتى لو تبدّلت بسرعة كبيرة وبصورة غير متوقعة. لا يُناسب الكائن أن تثبت صيغة تنفسه أو دقات قلبه، وينطبق الوصف عينه على أكثر الأجهزة رهافة التي تُنظم عمل الجسد الحي. ولذا، يقترح بعض الباحثين مثل آري غولدبيرغر، من كلية الطب في جامعة هارفارد، أن النُّظُم الديناميكية الصحية تُمارس نمطاً فراكتالياً، أي أنها تتكرر وتتغيّر في الوقت عينه عبر أبعاد مختلفة، وخصوصاً أن تركيبتها الفيزيائية تتبع هندسة الفراكتال؛ مثل تشعّب القصيبات

الهوائية وتفرع الأوعية الدموية، ما يُسهّل عملية التأقلم والتجاوب المرن مع المتغيّرات عبر امتلاك طيف واسع من الإيقاعات الذاتية. ولاحظ غولدبيرغر أن: «العمليات الفراكتالية ترتبط بطيف واسع من الأبعاد، لذا فإنها غنية بالمعطيات. وعلى عكسها، تعكس الحالات الدورية التكرارية الثابتة حالاً من الطيف الضيق وتميل لأن تكون رتيبة الإيقاع ومُكررة ومستنفدة المحتوى وضئيلة المعلومات». واقترح أن التعامل مع اضطرابات النُّظُم الحيّة يعتمد على توسيع الطيف الاحتياطي للنظام، بمعنى رفع قدرته على التعامل مع مجموعة كبيرة من التردّدات، مع عدم الوقوع أسيراً لـ«تثبيت الصيغة».

كما ورد سابقاً، دافع أرنولد ماندل، الطبيب النفساني من سان دييغو والضليع في الديناميكا، عن مقولة برناردو هبرمان عن حركة العين عند مرضى الشيزوفرينيا. ولاحقاً، عرض أفكاراً أكثر عمقاً عن دور نظرية الفوضى في علم الفيزيولوجيا. فقد تساءل: «هل باستطاعة رياضيات المرض، أي الكايوس، أن يكون حالاً للصحة أيضاً؟ وفي المقابل، هل نستطيع نعت رياضيات الصحة، حيث يسود المُتوقّع وما يمكن وصفه عبر مُعادلات تفاضلية، بأنها رياضيات المرض؟» لقد اهتم ماندل بأمر نظرية الفوضى منذ العام ١٩٧٧، عندما اكتشف «سلوكاً غريباً» عند بعض الأنزيمات في الدماغ، لا يمكن شرحه إلا باستخدام الرياضيات اللاخطيّة. وشجّع ماندل الدراسات التي تتناول الروابط المتذبذبة الثلاثية الأبعاد التي تُنسج بين البروتينات، عبر مفاهيم الرياضيات اللاخطيّة. ورأى أنه يجب على علماء البيولوجيا النظر إلى الجزيئات الحيوية في حالاتها الديناميكية، بدل الاكتفاء بدراستها في حال السكون، وضمنها قدرة تلك الجزيئات على الدخول في حالات انتقالية، بمعنى تبنيها نسقاً فوضوياً من النوع الكايوسي. وأولى جلّ اهتمامه لأكثر الأعضاء فوضوية على الإطلاق: الدماغ! وقال: «عندما تصل إلى حال الاستقرار بيولوجياً، فإنك تموت. إذا سألت عن دماغك، فلتعلم أنه ليس في حال استقرار إطلاقاً». (راجع الفصل الرابع «تقلبات الحياة» ـ عن الحيوانات التي لا تُشبه الفيل).

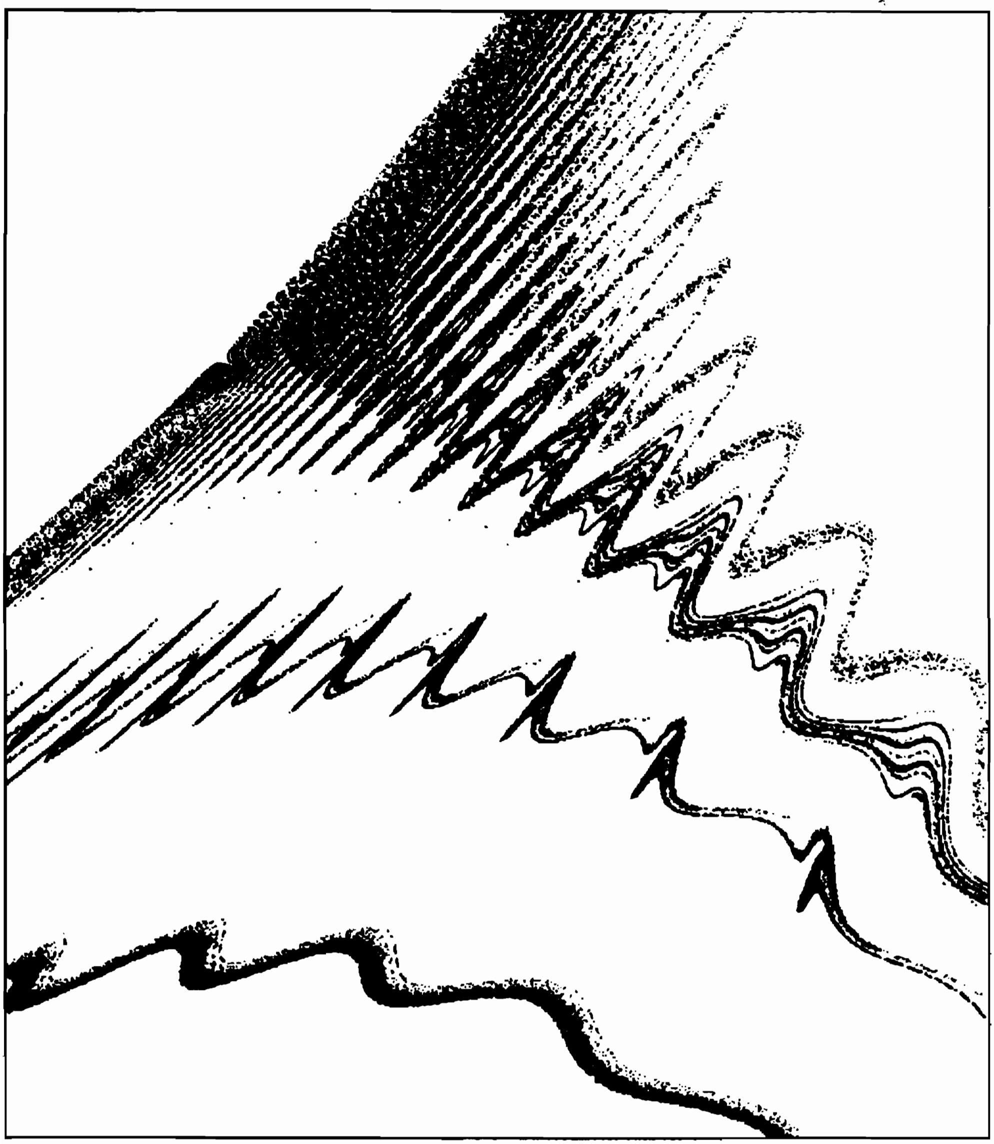
ونظر ماندل إلى اكتشافات الكايوس باعتبارها انتقالاً في طريقة تفكير الطب في علاج

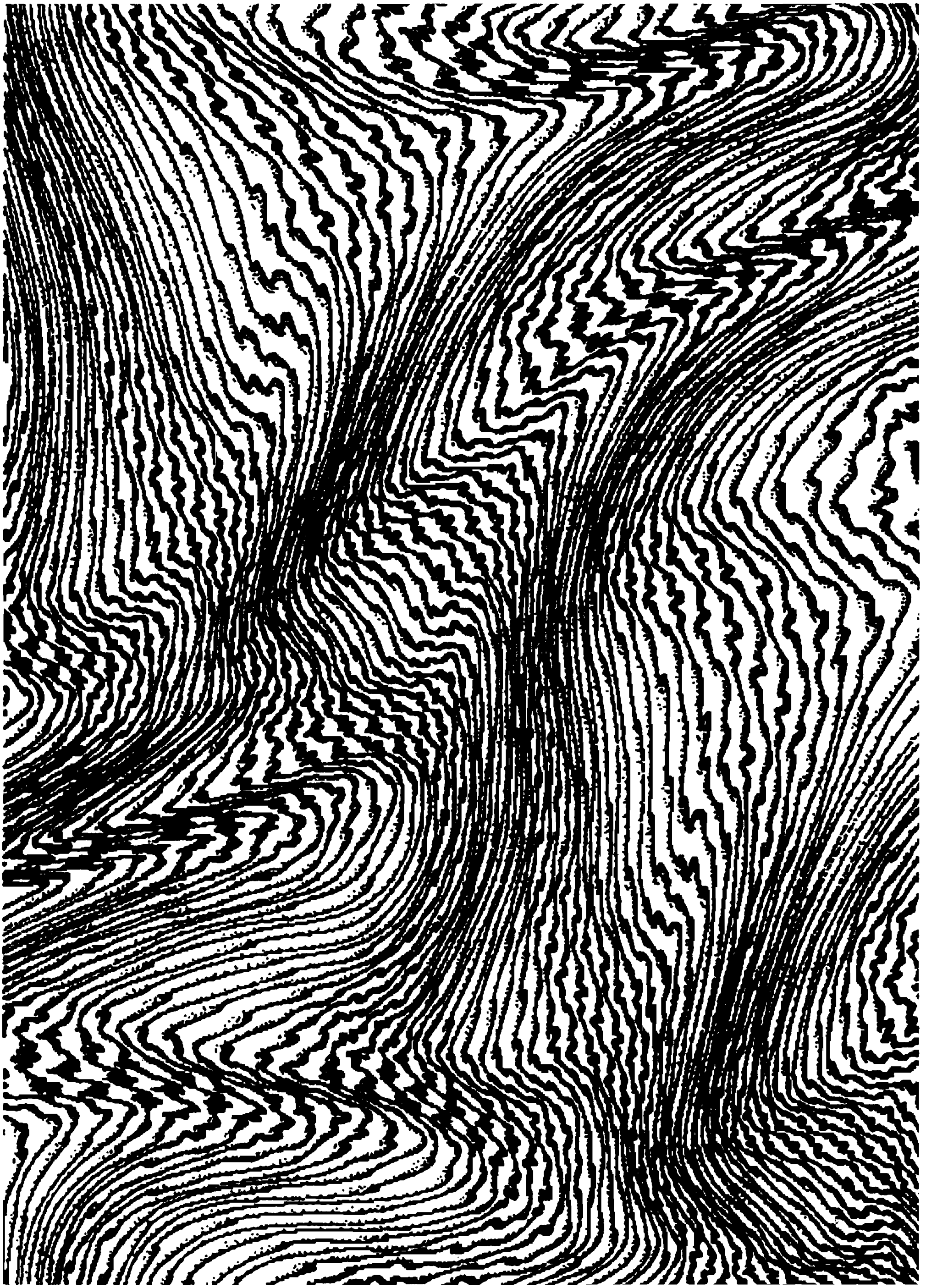
المرضى النفسانيين. واعتبر أن باستطاعة أي تقويم مُنصف الاستنتاج أن صناعة «الأدوية السيكولوجية» ليست سوى فشل علمي. إذ لا يشفى سوى قلّة من المرضى. تستطيع تلك الأدوية السيطرة على أكثر المظاهر عنفاً من الاعتلال النفسي-العقلي، لكنها تولّد آثاراً جانبية لا يعرف الكثير عنها، على المدى الطويل. وأشار ماندل إلى التقارير التي تقوّم أكثر الأدوية النفسانية استعمالاً. فمثلاً، يزيد اللارجاكتيل المستعمل علاجاً في حال الشيزوفرينيا؛ الحال الأساسي للمريض سوءاً. ويرتبط استعمال الأدوية الثلاثية الحلقات مع زيادة في تقلّبات المزاج، ما يؤدي إلى ارتفاع فترات مُعاودة الكآبة. ولم ينجُ من التقويم السلبي لماندل سوى الليثيوم الذي يُحقّق نجاحاً نسبياً في بعض الأمراض الفُصامية.

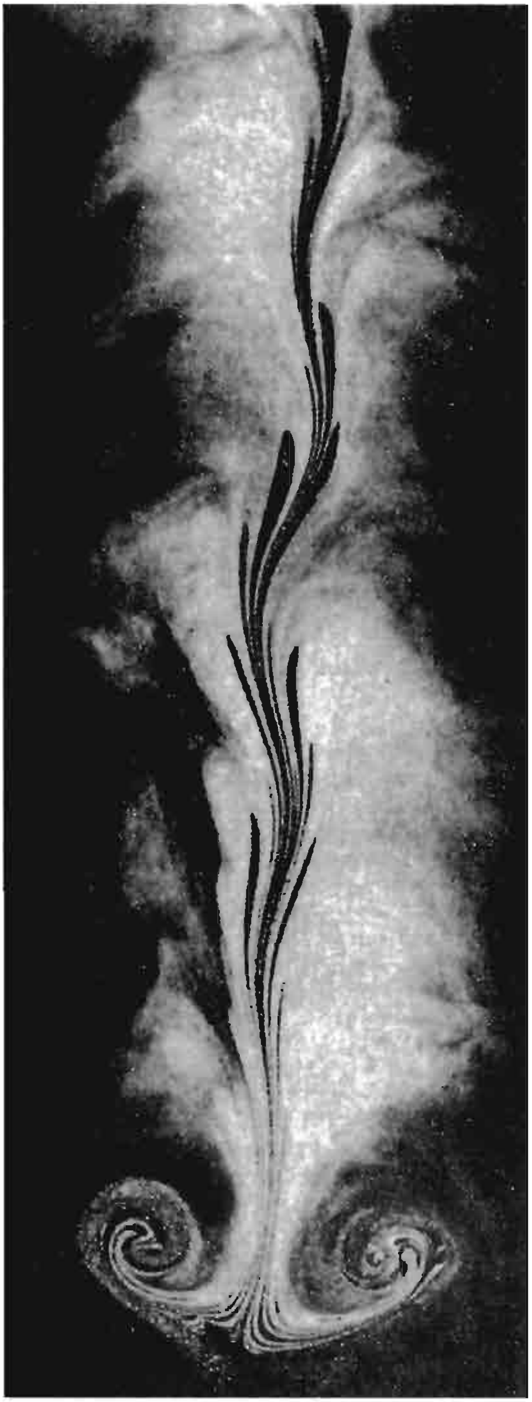
وبحسب رؤيته، تكمن المشكلة في المفاهيم الأساسية للطب النفسي ـ العقلي. إذ تتميز الطُرُق التقليدية المُتّبعة في علاج «الآلة الأكثر تقلّباً وتقلقلاً وديناميكية وتعدُّداً في الأبعاد»، برؤية ترتكز إلى بُعد وحيد واختزالي. وبحسب تعبير ماندل: «يحافظ نموذج التفكير الأساسي على نسق رتيب مثل: جين وحيد يصنع بروتيناً وحيداً يولّد أنزيماً وحيداً يُركّب ناقلاً كيماوياً عصبياً وحيداً يتفاعل مع مُستقبل عصبي وحيد يدفع إلى سلوك وحيد يتخلل السلوك فيؤدي إلى مرض وحيد يحتاج إلى دواء وحيد يقوّم عبر مقياس وحيد. ويسيطر هذا النموذج على مُعظم الأبحاث والعلاجات في علم الأدوية النفسانية.

أكثر من ٥٠ ناقلاً عصبياً كيماوياً، آلاف من أنواع الخلايا العصبية، ظواهر كهرومغناطيسية مُعقّدة، وحال مستمر من التقلقل المرتكز على أنشطة مستقلة في أبعاد مختلفة (من البروتينات إلى تخطيط الدماغ)، وما زال الأطباء يفكرون في الدماغ وكأنه كيمياء بسيطة، تُشبه آلات تحويل المكالمات التليفونية القديمة حيث يصل الرقم إلى الرقم عبر توصيلة وحيدة وبسلك وحيد». وبالنسبة إلى شخص ضليع في الديناميكا اللاخطيّة، يصعب عدم اعتبار الصورة السابقة سذاجة مُطبقة. بتلك الطريقة ناقش ماندل زملاءه مُناشداً إياهم فهم هندسة التدفّقات التي تديم عمل نُظُم مُعقّدة مثل الدماغ.

التناغمات الفوضوية: ينجم من التفاعل بين إيقاعات مختلفة، مثل موجات الراديو أو مدارات الكواكب، نوع خاص من الفوضى. يظهر الرسم إلى الأسفل وفي الصفحة المقابلة، صوراً من صنع الكومبيوتر لبعض «الجواذب» التي تنشأ من تداخل ثلاثة إيقاعات معاً.







التدفقات الفوضوية: يؤدي غمس عصا في سائل لزج إلى شكل متماوج بسيط. فإذا كُررت عملية الغمس، يُصبح الشكل أكثر تعقيداً.



شرع كثير من العلماء في تطبيق مُعادلات الكايوس على أبحاث الذكاء الاصطناعي. واستعملوا المُعادلات عن النُّظُم المتأرجحة بين جواذب الأحواض النهرية، لصنع نماذج عن الذاكرة والرموز. إذ يستطيع الفيزيائيّ أن ينظر إلى الأفكار باعتبارها مناطق ذات حدود مشوشة، بحيث تنفصل ولكنها تتداخل أيضاً؛ وتجذب مثل المغناطيس لكنها تُفلت بعض ما تُمسكهُ. ولذا، يجد ذلك الفيزيائيّ نفسه مدفوعاً للتفكير بصورة «جواذب أحواض الأنهار». وتظهر له هذه النماذج وكأنها تملك الملامح المُناسبة: نقاط من الثبات متمازجة مع عدم الثبات، ومناطق بحدود مُتغيّرة باستمرار. ويعطي التركيب الفراكتالي صفة المرجعية الذاتية واللانهائية التي تبدو مركزية بالنسبة إلى وصف قدرة الدماغ على توليد الأفكار والقرارات والعواطف وغيرها من مظاهر الوعي الانساني.

لم يعد باستطاعة الباحثين في مجال الوعي الإنساني، سواء استخدموا نظرية الكايوس أو تركوها، استعمال نماذج ساكنة لوصف تركيب العقل. لقد باتوا يُدركون وجود تراتبية للأبعاد، من الخلية العصبية صعوداً، تُعطي الفرصة للتداخل بين المقاييس الدقيقة والكبيرة، التي تُذكّر أيضاً بمميزات الاضطراب في السوائل وغيرها من الديناميكيات المُعقّدة.

لقد وُلِدَ نمط من خلال انهيار الشكليات: ذلك هو جمال البيولوجيا الأساسي وسِرّها الأساسي أيضاً. تمتص الحياة النظام من بحر الفوضى. لقد لاحظ أرفينغ شرودنغر، أحد مؤسسي الفيزياء الكمومية، هذا الأمر قبل عشرات السنوات. وحاول كفيزيائيّ أن يُقدم نظرة من زاوية تخصصه إلى ظاهرة الحياة نفسها.

وشدد على أن الكائنات الحيّة تملك قدرة مُدهشة على تركيز «تيار من النظام» على نفسها، ما يجعلها تنجو من مصير الانحلال إلى فوضى من الذرّات. وبيّن أن المادة الحيّة تختلف عن كل ما يدرسه الفيزيائيون من مواد في الكون. وخَمّن ما لم يكن معروفاً حينذاك: أن اللبنة الأساسية للكائنات الحية تتألف من بلورة غير دورية (بحيث تقدر دوماً على التكرار الذي لا يُعيد نفسه أبداً بل يتغيّر دوماً)؛ على عكس البلورات الدورية

التركيب التي تُهيمن على المواد غير الحيّة كلها. وقال: «بالنسبة إلى عقلي المتواضع، أعترف بأن المادة الحيّة مُدهشة ومُعقّدة... إنها تؤلف أحد أكثر المواد إدهاشاً وتعقيداً في الكون». وشبّه الفرق بين المادة الحيّة والجامدة بالفارق بين رسم على حائط وحياكة سجادة هائلة الزركشة؛ بين التكرار المُنتظم للنمط عينه وغنى الإبداع الفني.

ولاحِظ أن الفيزيائيّ يُدرّب ليفهم الرسم على الحائط، فليس غريباً إن لم تُساهم الفيزياء كثيراً في تطور البيولوجيا. لقد كانت رؤية شرودنغر استثنائية. والأرجح أنه كان مُحقاً في وصف الحياة كمزيج من المُعقّد والمنتظم. لكنه تألّق كثيراً حين نظر إلى التنوّع في الكائنات الحيّة باعتباره ناجماً عن صفة غير دورية في أساس تركيب المادة الحيّة. وقد ثبت صدق ما ذهب إليه عند اكتشاف الحمض النووي الوراثي في نواة الخلية الحيّة. وحين قال شرودنغر تلك المقولة، لم تكن علوم الرياضيات ولا البيولوجيا لتدعم رأيه! فلم يكن العلم قد توصّل إلى أدوات لتحليل ما هو غير منتظم، باعتباره اللبنة الأساسية للحياة. وأما الآن، ومع نظرية الفوضى، فإن تلك الأدوات موجودة علمياً.

ما بعد الكايوس

«إنه تصنيف لمُكوّنات الفوضى، ليس المكتوب هنا أقل من ذلك».

هيرمان ملفيل ـ رواية «موبي ديك»

قبل عقدين، فكّر إدوارد لورنز في الطقس، وميشيل هينو في النجوم، وروبرت ماي في توازن الطبيعة. لم يكن بنواه ماندلبروت سوى عالم رياضيات مغمور في شركة «أي بي أم» للكومبيوتر، وميتشل فايينبوم طالب على وشك التخرّج في «سيتي كوليدج» في نيويورك، ودوني فارمر طفل يلهو في مدينة «نيو مكسيكو». وتشارك معظم الفيزيائيين في مجموعة من الأفكار عن التعقيد. وبدت أفكارهم متقاربة حتى إنهم لم يهتموا بوضعها في صيغ مكتوبة.

ولاحقاً، بات ممكناً القول ما الذي كانته تلك الأفكار، ومن ثم وضعها موضع الاختبار. «النُّظُم البسيطة تعمل بطرق بسيطة». وساد الظن بأن آلات بسيطة مثل رقّاص الساعة والدارات الكهربائية الصغيرة ومجموعة مثالية من الأسماك في حوض، تلك الأشياء أمكن اختزالها إلى قوانين قليلة، ومفهومة وتعمل بانتظام حتمي، ويبقى سلوكها ثابتاً وقابلاً للتوقع على المدى الطويل.

«السلوك المُعقّد يشير إلى أسباب مُعقّدة». إن أشياء مثل الآلات الميكانيكية والدارات الكهربائية والمجموعات الحيوانية التي تسكن البراري، وتدفق السوائل والأعضاء الحيّة وحُزم الجُسيمات والعواصف والاقتصاد الوطني، هي نماذج عن نظام واضح الاضطراب وسلوكه غير متوقع أو منفلت، لذا يجب التدخل للسيطرة عليه بواسطة السيطرة على مجموعة كبيرة من مكوّناته، أو تركه لكي تعبث به المؤثرات الخارجية العشوائية.

«النُّظُم المختلفة تتصرف بطرق مختلفة». إن عالم بيولوجيا الأعصاب يصرف عمره في درس كيمياء الأعصاب عند الإنسان ومن دون أن يعرف شيئاً عن الذاكرة أو الإدراك. ويستعمل مهندس الطائرة «نفق الريح» لحل مشكلات انسياب الهواء على أجنحة الطائرة

وهيكلها من دون دراسة الرياضيات المتعلّقة بالاضطراب. ويُحلّل عالم الاقتصاد سيكولوجياً عمليات الشراء وقراراتها من دون التوصّل إلى قراءة الميول البعيدة المدى للجمهور. إن الجمهرة التي سبق ذكرها من العلماء سلمت، ولفترات طويلة، بأن النُّظُم المُعقّدة تتألف من بلايين المُكوّنات، وأنها حتماً مختلفة تماماً.

وفجأةً تغيّرت كل المقولات التي وردت أعلاه. لم يعد أحد يصدقها ولا يقبل بها. وعلى مدار عشرين سنة، ابتكرت مجموعة جديدة من الأفكار على أيدي علماء الفيزياء والرياضيات والبيولوجيا والفلك.

وعُدّلت المقولات السابقة جذرياً، وعلى النحو الآتي: «النُّظُم البسيطة في إمكانها أن تولّد سلوكاً مُعقّداً»؛ «النُّظُم المُعقّدة يمكن أن تُعطي سلوكاً بسيطاً». والأهم ترسّخ القول إن قوانين التعقيد شاملة، وتنطبق على نُظُم في مجالات متباينة، وبالتالي فإنها لا تعتمد على المُكوّنات الدقيقة والذرية للنظام.

وبالنسبة إلى جموع من العلماء، في حقول متباعدة مثل الفيزياء والأعصاب والرياضيات، لم يظهر أهمية هذا التغيير الفكري بصورة مباشرة وفورية. وتابع الكثيرون بحوثهم المتخصصة من دون أن يُلقوا له بالاً. ولكنهم سمعوا بشيء اسمه نظرية الفوضى (الكايوس). وعلموا أن بعض الظواهر المُعقّدة باتت قابلة للتفسير، وأن ظواهر أُخرى تحتاج إلى إعادة النظر فيها. إن عالماً يدرس التفاعلات الكيماوية في مختبر أو يتابع تطوُّر عدد مجموعة من الحشرات في بستان، أو يصنع نموذجاً على الكومبيوتر لتبدُّلات الحرارة في المحيط، لم يعد ينظر إلى التقلّبات أو التذبذبات الهيّنة بالطريقة القديمة، وبمعنى آخر، لم يعد يتجاهلها. وفي المقابل، فقد علموا أيضاً، أن الحكومة والمؤسسات الكبرى ترصد أموالاً هائلة للبحوث الجديدة التي تتناول التغييرات الهيّنة والتذبذبات الطفيفة في الظواهر المختلفة. وأدركت أعداد متزايدة من البحّاثة أن «نظرية الفوضى» (الكايوس) تمنح طريقة جديدة للتفكير في المعلومات القديمة، وخصوصاً تلك التي أُهملت بسبب خروجها عن المألوف. كما انتشر إحساس بأن الإفراط في تفريع

التخصّصات علمياً يشكّل عائقاً أمام بعض بحوثهم. ولمست أعداد متزايدة من العلماء أيضاً عبثية التركيز على دراسة الأجزاء بمعزل عن الصورة الكليّة. وبالنسبة لهؤلاء، أنهى الكايوس الأسلوب الاختزالي في التفكير علمياً.

وحيال هذا التغيير العميق الذي أحدثه الكايوس، تراكمت مشاعر من عدم الفهم والغضب والمقاومة والقبول. وعاش رواد نظرية الفوضى تلك المشاعر جميعها. ويتذكر جوزيف فورد، من «معهد جيورجيا للتقنية» أنه حاضر في أحد مواضيع الديناميكا الحرارية في سبعينات القرن العشرين، وذكر أن هنالك سلوكاً فوضوياً في إحدى المُعادلات الكلاسيكية عن الاحتكاك.

وقد بدا مثل ذلك السلوك، بالنسبة لفورد، واقعة مثيرة للاهتمام. لكنه لم يتمكن من نشر تلك المُحاضرة في مجلة «فيزيكال ريفيو ليترز» إلا بعد سنوات من المحاولات. وبالنسبة لتلك المجموعة التي استمعت إليه حينذاك، بدا الأمر وكأنه يقول لجماعة من دارسي علم تطور الأنواع (علم الإحاثة) إن الديناصورات لها ريش. لقد بدا قوله هرطقة. ولم يتأخر رد الفعل المستنكر من الحاضرين. لقد بدت جملته وكأنها تتحدّى تاريخاً من القبول والتسليم بالصحة المطلقة لتلك المُعادلة. لقد عانى رد فعل عدائياً ظل يتذكره طويلاً.

وذات ظهيرة شتوية، جلس فورد في مكتبه في اتلانتا بولاية جورجيا، يرتشف مشروباً من الصودا التي سُكبت في كأس كتب عليه «كايوس» بأحرف كبيرة. لقد مرّت سنوات على تلك المحاضرة عن مُعادلة الاحتكاك. وأخذ يُصغي إلى تجربة رونالد فوكس، زميله الشاب الذي عانى أيضاً أثناء تحوّله من الموقف التقليدي في التفكير إلى تبني الكايوس.

جاءت نقطة التحوّل في تفكير فوكس عندما اشترى كومبيوتر من نوع «ماك آبل ٢» لابنه. ولم يكن مألوفاً بعد استعمال مثل تلك الكومبيوترات في علوم الفيزياء. وحينذاك، سمع فوكس أن ميتشل فايينبوم اكتشف قوانين شاملة تتحكم بمُعادلات التغذية الارجاعية في الظواهر كلها. وصمّم على كتابة برنامج صغير لكي يرى ذلك السلوك على كومبيوتر.

ورأى ظاهرة الكايوس تظهر على الشاشة، وضمنها تفرّع المذراة وتكسّر الخط الوحيد إلى مجموعة لا متناهية من النقاط التي تملأ مساحة مُحددة، ثم ظهور الفوضى، ثم رؤية الانتظام الكامن ضمن الفوضى عبر أشكال تنتمي إلى هندسة التكرار المتغيّر (فراكتال). وخلال يومين، استطاع إعادة انتاج ما فعله فايينبوم بأكمله. وأقنعه ذلك بتبني نظرية الكايوس، وأخذ يقنع الآخرين بها أيضاً.

جرب بعض العلماء مثل تلك البرامج على كومبيوتراتهم. وتوصلوا إلى نتائج متنوعة. توقفت بعض البرامج بسرعة، فكأنها تحطمت. وبعضها تغيّر سلوكه بسرعة. وتميّز فوكس بتنبهه إلى محدودية العلوم التقليدية المرتكزة على المُعادلات الخطيّة ومفاهيمها. وعلم أن علم الفيزياء حرص تقليدياً على تنحية المسائل ذات الصلة بالرياضيات اللاخطيّة، وبذا تشرّب الفيزيائيون الميل تقليدياً لتجنب الخوض في تجارب قد تقودهم إلى ذلك النوع من الرياضيات. وشرع ذلك الأمر في التغيّر تدريجاً أيضاً. وعبر فوكس عن ذلك بقوله: «لقد بدأ كثير من العلماء في الالتفات إلى أهمية المُعادلات اللاخطيّة، ببطء في البداية، لكن بسرعة مضطردة... صار الجميع مهتماً بها لأنها أثبتت جدواها عبر نظرية الكايوس.

وبات في وسعك النظر إلى أي مسألة، بغض النظر عن علاقتها مع الرياضيات اللاخطيّة. لقد وفّرت نظرية الفوضى أدوات للتعامل مع الحركة اللاخطيّة ومُعادلاتها، مما جعل العلماء مقدامين في التجارب على ذلك النوع من الحركة فيزيائياً... شرعت تلك المساحة في التوسّع. بدا ذلك منطقياً لأنها ساعدت كثيرين على تعديل نتائج بحوثهم، على ضوء الكايوس، فتوصلوا إلى نتائج باهرة. وبالنسبة إلي، كان الكايوس حُلماً يتحقق».

وفي المقابل، لم يكن وصف مصطلح الكايوس موضع اتفاق عام. فقد استخرج فيليب هولمز، وهو عالم رياضيات من جامعة كورنيل ذو لحية بيضاء يقرض الشعر، المصطلحات التالية من قاموس أوكسفورد في وصف الكايوس: المُعقّد، اللادوري،

المدارات الجاذبة (غالباً ذات أبعاد قليلة) ضمن بعض النُّظُم الديناميكية.

وجمع هاو باي ـ لين، فيزيائي من الصين، أوراقاً عن تاريخ الكايوس، فوجد فيها التفسيرات التالية: «نوع من النظام من دون نسق دوري»؛ و«حقل جديد يتوسع بسرعة ويساهم فيه علماء رياضيات وفيزياء وأيكولوجيا وديناميكا السوائل وغيرهم»؛ و«ظاهرة طبيعية لوحُظت حديثاً ومن نوع كليّ القدرة».

واستخرج بروس ستيوارت، وهو عالِم في «مختبر بروكهافن الوطني (الأميركي)» الشروح التالية: السلوك اللامنتظم واللامُتوقّع للنُّظُم الديناميكية الحتمية اللاخطيّة.

ووصفه جايمس كراتشفيلد، من جماعة «سانتا كروز» كالآتي: ديناميكية تتصف بـ«مقدار من البَدَد» تراكمية... السلوك الذي يُعطي معلومات (بمعنى تكبير المقادير الهيّنة من عدم التيقن) لكنه ليس متوقعاً بالمرة.

ووصفه فورد الذي اعتبر نفسه من المُبشرين بالكايوس، بهذه الكلمات: ديناميكيات تلاحظ عند التحرّر من الانتظام والايقاع الدوري؛ النُّظُم التي تُخضع نفسها لتقصي احتمالاتها المختلفة بالطرق العشوائية... نوع مثير يأتي من تجمع غني بالتنوّع وحرية الاحتمالات والفُرص المتكاثرة.

واعتبر جون هوبارد، أثناء محاولته إعادة الاشتغال على معادلات «التكرار المتغيّر» (فراكتال) لمجموعة ماندلبروت، إن الكايوس هو مصطلح فقير الدلالة، لأنه يشير فقط إلى العشوائية. وبالنسبة إليه، فإن الرسالة الحقيقية تكمن في قدرة العمليات البسيطة في الطبيعة على إنتاج سلوك مُعقّد من دون عشوائية.

وتُقدّم الحركة اللاخطيّة والتغذية الراجعة الأدوات اللازمة كلها لتشفير، ثم صنع، تراكيب شديدة التعقيد مثل دماغ الانسان.

وبدا مصطلح الكايوس ضيّق الدلالة أيضاً بالنسبة لعلماء مثل آرثر وينفري، حاولوا تطبيق الهندسة اللاكمية الشاملة في إطار علوم البيولوجيا. ورأوا أن المصطلح يشير إلى

نُظُم بسيطة مثل الخرائط ذات البُعد الواحد التي رسمها فايينبوم، والجواذب الغريبة (بأبعاد لا تتجاوز الثلاثة) التي رصدها ديفيد رييال. وأحس وينفري بأن الكايوس القليل الأبعاد يمثّل حالاً خاصة ضمن طيف أكثر اتساعاً.

واهتم بالقوانين التي تتناول الظواهر المُعقدة ذات الأبعاد المُتعدّدة، إذ اقتنع بوجود مثل تلك القوانين. وبدا له أن ثمة عالماً شديد الغنى خلف حدود الكايوس ذي الأبعاد المحدودة.

وأدارت مجلة «نايتشر» العلمية نقاشاً عن وجود جواذب غريبة في مناخ الكرة الأرضية. وسعى علماء الاقتصاد للعثور على جواذب غريبة في ميول السوق، ولم يعثروا عليها إلى الآن! وأمل المتخصصون بالحركة الديناميكية استعمال أدوات التحليل في نظرية الكايوس لشرح الاضطراب الكامل. وحاول ألبرت ليبشابيه، الذي بات مُحاضراً في جامعة شيكاغو، استعمال أسلوبه الأنيق في التحليل الرياضي لتطوير الفهم عن الاضطراب، عبر تجربة تتضمن الهيليوم السائل في علبة تفوق تلك التي صنعها في العام ١٩٧٧ بآلاف المرات! ولا يعرف أحد هل كانت تجاربه التي تُحدث اضطراباً مكانياً وزمانياً في السوائل، ستعثر على جواذب غريبة وبسيطة. وبحسب وصف برناردو هبرمان: «إذا توصلت إلى التعرّف على جاذب غريب في نهر جار فعلياً، فسيكون ذلك اكتشافاً علمياً مذهلاً».

لقد جسّد الكايوس مجموعة من الأفكار أقنعت كل أولئك العلماء بأنهم يساهمون في ولادة علم جديد. وسواء تخصصوا في البيولوجيا أو الرياضيات أو الفيزياء، فإنهم آمنوا بأن النُّظُم البسيطة الحتمية باستطاعتها أن تُنتج سلوكاً فائق التعقيد، وبأن النُّظُم المُعقّدة في الرياضيات التقليدية نفسها تخضع لقوانين بسيطة غير تقليدية؛ وبأن أياً كان حقل اختصاصهم، فإن مهمتهم تتمثل في فهم التعقيد كظاهرة في ذاتها. وكتب جايمس لوفلوك، مؤلف «فرضية غيّاه» الآتي: «إن النظرة الأولى تُظهر (علم الكايوس) وكأنه جزء من الجحيم الذي وصفه الشاعر الايطالي الشهير دانتي إليغري في «الكوميديا الالهية».

ولكن، يجب التفكير في تلك الخلاصة جيداً. إذ يمثّل القانون الثاني للديناميكا الحرارية نوعاً من التوقع العلمي الذي أثار كثيراً من الأخيلة حوله.

ولقد تنبأ بتبدُّد تدريجي للانتظام في الكون فيذوي غارقاً في الفوضى. وقرّر أن كل عملية انتقال للطاقة تتضمن خسارة لبعض الحرارة. وأصرّ على استحالة الكمال. ورسم صورة حتْمية لكون يسير نحو مصير محتوم. ويفرض أن مقدار البَدَد في الطاقة (الإنتروبيا) يتعاظم باستمرار كونياً، وفي كل نظام مفترض فيه. وأياً كانت صيغته، فمن الصعب القول إنه قانون مُغر وجذّاب.

يصح ذلك الاستنتاج بالنسبة إلى علم الديناميكا الحرارية. أما بالنسبة إلى الحقول الفكرية خارج ذلك العلم، فإن القانون الثاني يملك صورة مُغايرة. ويشار إليه عند تفسير تفكك المجتمعات، وتدهور الاقتصاد، والتحلّل الاخلاقي وغيرها من الظواهر التي تتضمن تفكّكاً. وراهناً، تبدو تلك الصور الفكرية عن القانون الثاني مُضلّلة تماماً. ففي عالمنا، يزدهر التعقيد، ويجدر بالباحثين عن طرق لتفهم الطبيعة وطرائقها، أن يتنبهوا لنظرية الكايوس.

وبطريقة ما، يميل الكون للوصول إلى حال من الاستقرار في خضم صورة غائمة حرارياً من الإنتروبيا المتطرفة. وينجح في صنع أشكال مُثيرة للاهتمام.

وعندما تعمّق بعض علماء الفيزياء في قوانين الديناميكا الحرارية، أدركوا أنها تنطوي على سؤال مُحيّر: «كيف يمكن للتدفق العشوائي للطاقة أن يمدّ الكون بظواهر مثل الحياة والذكاء؟». ويزيد مفهوم الإنتروبيا من حدّة هذا السؤال وصعوبته. إذ يصعب القول إن مقدار البدَد (الإنتروبيا) يصلح لقياس مدى اللاانتظام كونياً. والحق أن بعض الفيزيائيين يجدون صعوبة في تحديد الانتظام في الماء، عندما يتحوّل إلى بلورات الثلج فيما ينزف حرارته إلى الخارج. وتفشل الإنتروبيا تماماً في قياس التبدّل الشكلي لعمليات صنع البروتينات الوراثية (الأحماض الأمينية)، وتوليد الكائنات الدقيقة، وللتكاثر في الحيوان والنبات، ولظهور نُظُم مُعقّدة مثل دماغ الانسان. ومن المتوقع أن تتبع تلك الجُزر

المعزولة من الانتظام، القانون الثاني للديناميكا الحرارية. ولكن القوانين الأهم التي تفسرها، هي في مكان آخر.

إذ تصنع الطبيعة الأنماط، فيأتي بعضها منتظماً في المكان ولكنه يفتقد الانتظام زمانياً؛ فيما يظهر بعضها الآخر على عكس ذلك. تتبع بعض الأنماط هندسة الفراكتال، فتُظهر بُنية تتشابه مع ذاتها عبر مقاييس مختلفة. وتصل أنماط أُخرى إلى حال مستقرة أو متذبذبة. لقد صار تكوّن الأنماط علماً ضمن الفيزياء وعلوم المادة، مما أتاح للعلماء صنع نماذج عن تجمع الجُسيمات في مجاميع صغيرة، وعن تفرق الشحنات الكهربائية عند انتشارها، وعن نمو البلورات في الثلج، وعن اللدائن المعدنية.

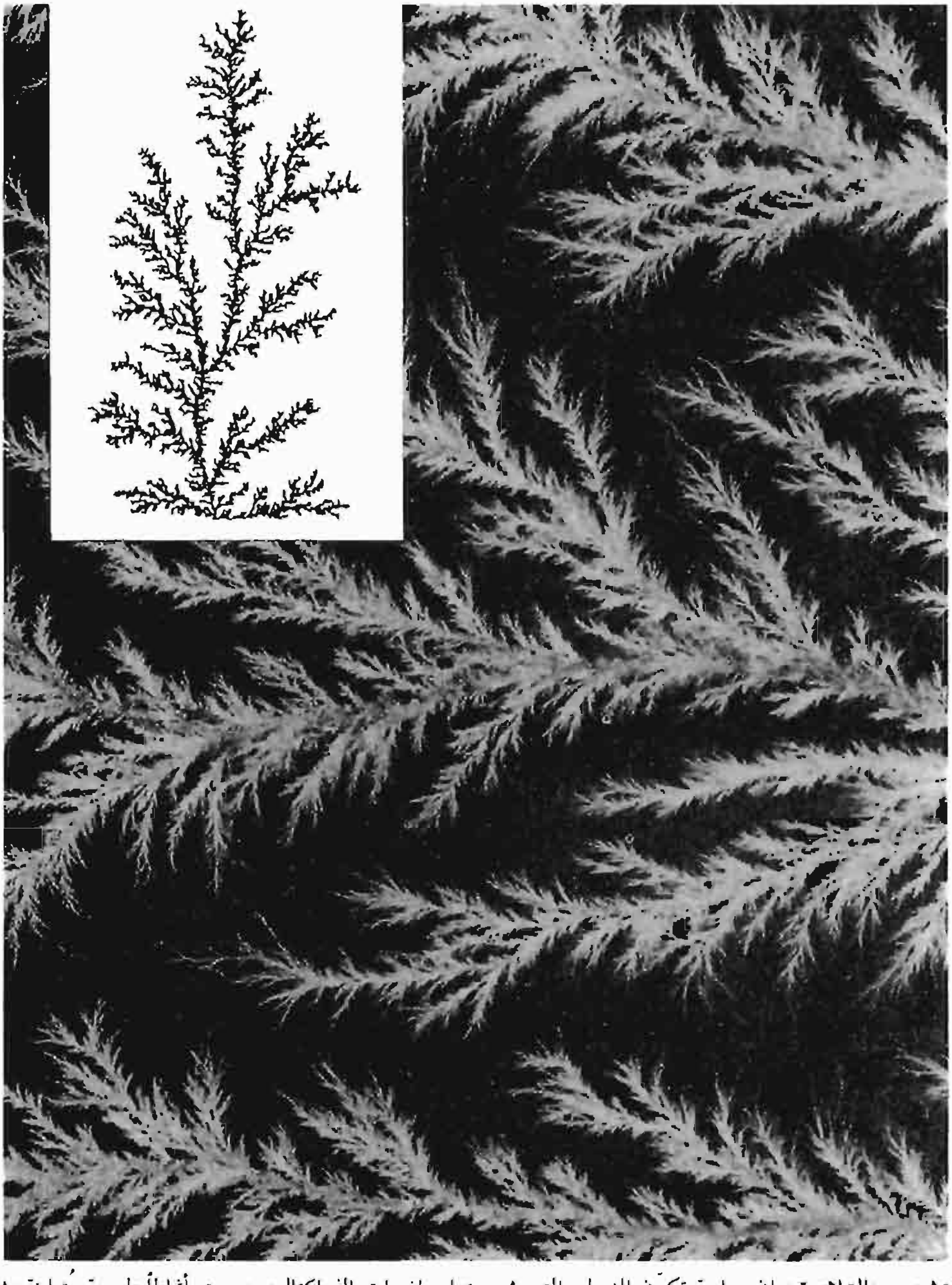
وفي المقابل، تبدو آليات تلك الصنائع بسيطة، فلا تزيد على أشكال تتغيّر عبر الزمان والمكان. ولم يستطع العلم فهمها إلا عبر الكايوس. وبذا، صار من المقبول أن يُطرح على علم الفيزياء سؤال من نوع: «لماذا تتنوّع أشكال ندف الثلج؟». تتكوّن بلورات الثلج في سياق اضطراب الهواء، ما يُعطي مزيجاً شهيراً من التماثل وفُرص التغيير، يُعبِّر عنه الجمال الأخاذ لعدم القدرة المُضاعفة على التحديد الدقيق. ومع تجمّد الماء، تصنع البلورات رؤوساً صغيرة تنمو تدريجاً. وتكون حدودها غير مستقرة، فتنبثق رؤوس أُخرى من تلك الرؤوس. ومن المُدهش أن بلورات الثلج تسير وفق قوانين رياضية مُرهفة، ومع ذلك فقد استحال التنبؤ بسرعة ظهور الرؤوس، وتقدير المسافات بينها، ومقدار تشعباتها. ورسمت أجيال من العلماء مسودات عن أنماط تكوّن الندف؛ ظهرت فيها صفائح وأعمدة، وبلورات وبلورات متعددة، وإبر وأسنان. وتعاملت الدراسات العلمية مع تكوّن البلّورات باعتباره مسألة تصنيف، لأنها لم تمتلك مقاربة أفضل.

وراهناً، يُنظر إلى نمو تلك الرؤوس والأسنان على أنه مسألة تتعلق بالحدود اللاخطية الحُرّة وغير المستقرة. ويعني ذلك صنع نماذج لتقصي تلك الحدود الرجراجة والمتقلقلة في سياق تغيّراتها الديناميكية. وعندما تسير عملية التصلّب من الخارج إلى الداخل، تغدو الحدود مستقرة وناعمة، وتسير سرعة التصلّب بالتناغم مع قدرة الجدران المحتوية

للسائل على القذف بالحرارة خارجاً. وفي المقابل، فعندما تسير عملية التصلّب من الداخل إلى الخارج انطلاقاً من نواة داخلية، كحال ندف الثلوج، فإنها تلتقط جزيئات الماء خلال سقوطها عبر الهواء المُشبع بالرطوبة، فتصبح العملية غير مستقرة. ويمكن لأي جزءٍ من الحدود أن يخرج عن نسق «جيرانه» فيلتقط جزيئات الماء بطريقة مختلفة عنهم، ويحولها إلى بلورات بسرعة مختلفة أيضاً. وسرعان ما تنمو تشعّبات وتتفرع منها تشعّبات.

ثمة صعوبة لافتة في تحديد أي من القوى الفيزيائية المشاركة في تلك العملية يمكن تجاهلها فعلياً. والأكثر أهمية، كما علم العلماء طويلاً هو تبدّد الحرارة التي يفقدها الماء عند تحوّله ثلجاً. وفي المقابل، لا تستطيع فيزياء التبدّد الحراري أن تشرح عملية تكوّن الأنماط التي تُشاهد في ندف الثلوج. وأخيراً، توصّل العلماء إلى إدخال عملية أُخرى في حساباتهم: التوتر السطحي للسوائل. إن القلب من النموذج الجديد عن ندف الثلج هو أساس نظرية الكايوس: توازن دقيق بين قوى الاستقرار والفوضى؛ إنه أيضاً ذلك التداخل القوي بين القوى على المقاييس الذرية الدقيقة وبين القوى التي تعمل على المقاييس التي نستعملها في الحياة اليومية.

يولّد التوتر السطحي للسوائل الاستقرار، فيما تميل السخونة إلى زعزعته. تجعل قوة الشدّ على السطح حدود السائل ناعمة مثل جدران فقاعة صابون. وتلزم كميات من الطاقة لصنع حدود غير ناعمة. يعتمد التوازن بين هذين المَيلين على حجم البلورات. ويعمل نقل الحرارة على مقياس كبير نسبياً، فيما تسير عملية التوتر السطحي للسائل في المقياس الدقيق. وتقليدياً، ولأن تأثير التوتر السطحي هيّن، عمد الباحثون إلى تجاهلها. لم يعد الأمر كذلك راهناً. إذ أثبت الكايوس أن أشد المقاييس دقة تستطيع لعب دور حاسم، كما برهن أن تأثيرات السطح تتجاوب بشكل حسّاس مع التركيب الجزيئي للمادة المجمدة. وبالنسبة إلى عملية تحوّل الماء ثلجاً، يُعطي تناظر طبيعي ميلاً ذاتياً نحو ٦ اتجاهات مختلفة لنمو بلورات الثلج.



التشعب والتلاصق: إن دراسة تكوّن النمط، التي شجعتها رياضيات الفراكتال، جمعت أنماطاً طبيعية مُتباينة مثل مسارات البرق التي تُفرّغ فيها الشحنات الكهربائية القوية، والتجمعات العشوائية، المصنوعة بأسلوب المحاكاة الافتراضية، للجُسيمات المتحركة.

ودهش العلماء إذ اكتشفوا أن هذا المزيج من الاستقرار والفوضى يضخّم أثر القوى الميكروسكوبية، مما يخلق نوعاً من البنية الشبيه بالفراكتال أثناء صنع ندف الثلج. لم تأت المُعادلات الرياضية التي تصف هذه العملية من علماء المناخ، بل من اختصاصيي الفيزياء النظرية، إضافة إلى صُنّاع اللدائن، الذين أبدوا اهتماماً كبيراً بهذه العملية. إذ تتمتع المعادن بتناظر جزيئي مختلف، وكذلك بنية البلّورات؛ وتتفاعل تلك العوامل لتحدّد قوة اللدائن. وتبقى الرياضيات هي عينها في الحالين، لأن قوانين تكوّن الأنماط شاملة.

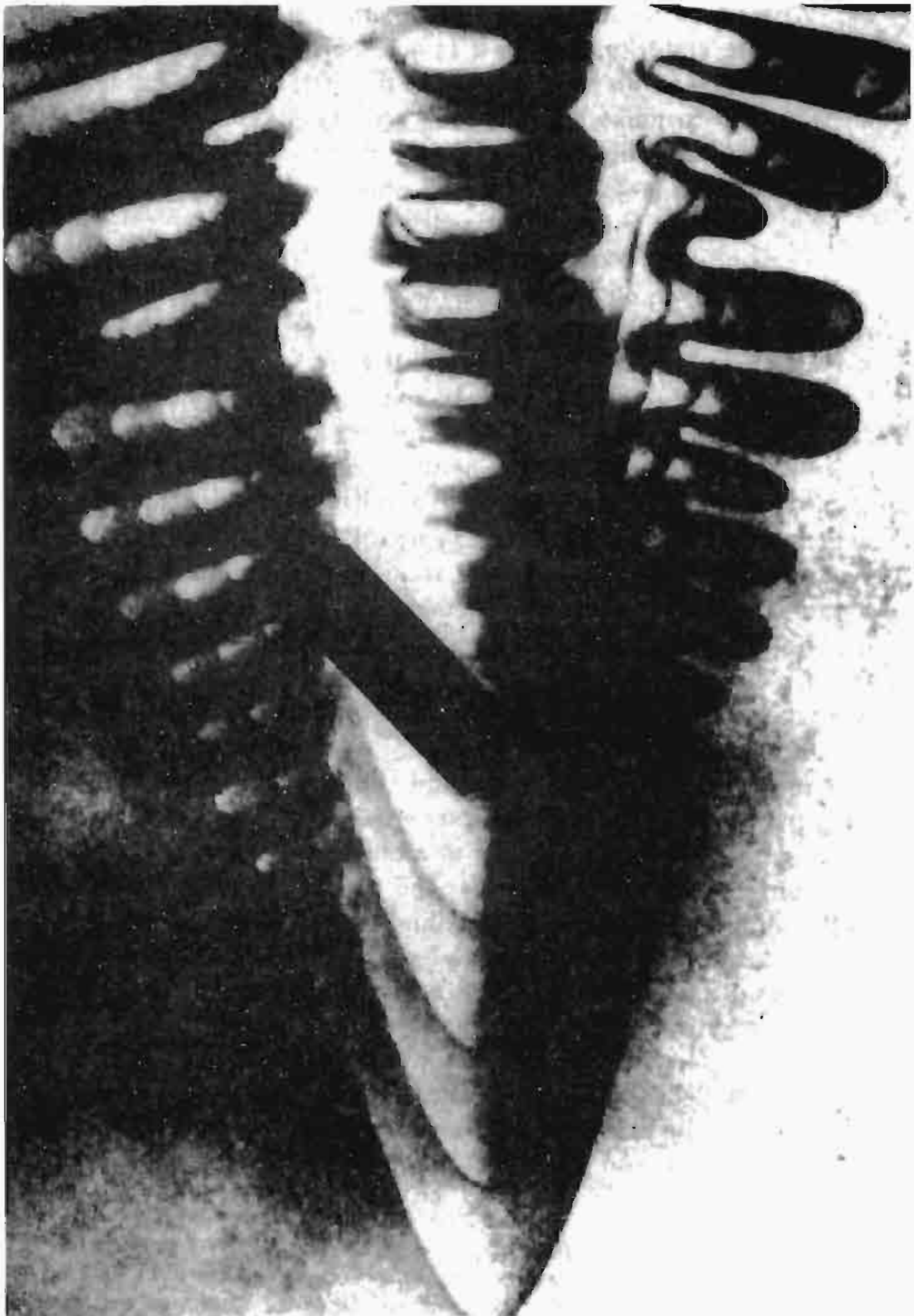
يفيد الاعتماد الحسّاس على الظروف الأولية في صنع الشكل النهائي للبلّورات. ومع سقوط الندف إلى الأرض، غالباً بعد أن يتأرجح لساعة أو أكثر في هواء عاصف، تعتمد خيارات التبلوّر على أشياء مثل الحرارة والرطوبة ووجود العوالق في الغلاف الجوي.

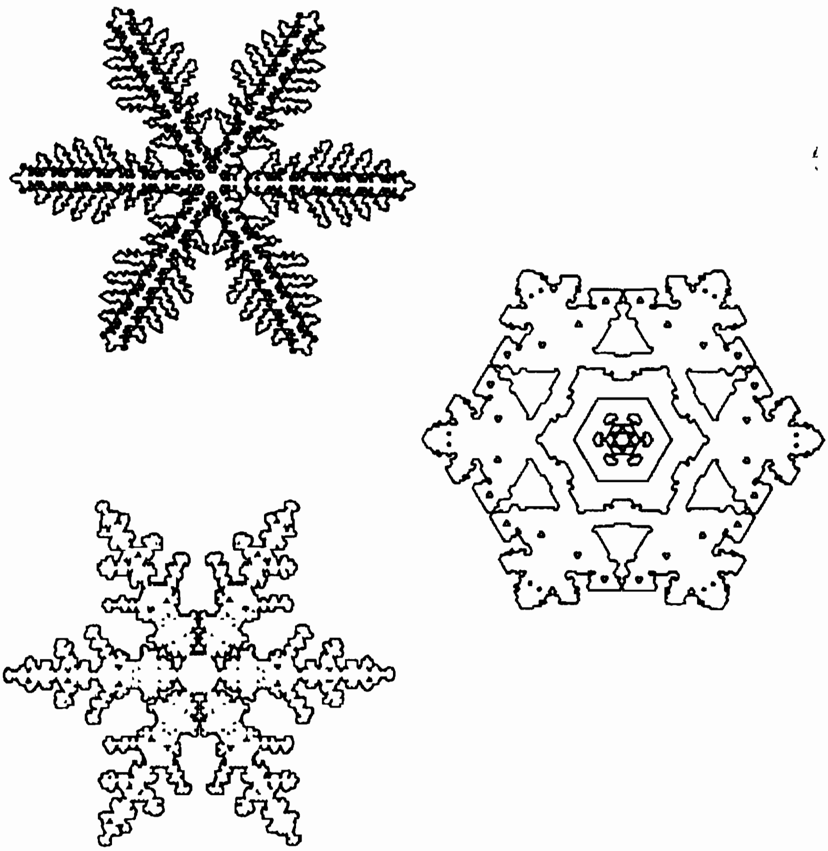
وتُحسّ الرؤوس السُداسية الشكل للندف بالحرارة نفسها، ولأن قوانين تكوّنها تسير بطريقة حتمية، فإنها تحتفظ بتناظر شبه تام. ويميل الاضطراب في الهواء لوضع أي زوج من الرؤوس في مسارين مختلفين. وبذا، يحمل الشكل النهائي الذي تستقر عليه بلورة الندف، تاريخ التقلّبات في الطقس التي عانتها، مما يعني أن احتمالات تشكيلاتها هي لا نهائية.

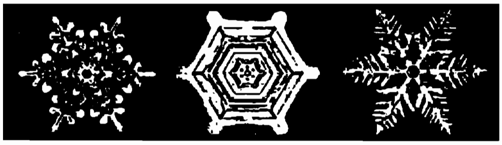
يميل علماء الفيزياء لوصف ندف الثلوج بأنها ظواهر غير مستقرة. إذ إنها تنجم عن عدم التوازن في تدفّق الطاقة بين مكوّنات متنوعة في الطبيعة. ويجعل التدفق من حدود السائل رؤوساً مسنّنة، سرعان ما تتشعب، فيتولّد تركيب فريد من نوعه. وكما اكتشف العلماء، فإن عدم الاستقرار يسير وفق قوانين شاملة في نظرية الفوضى. ولذا، نجح العلماء في تطبيق تلك القوانين عينها لدراسة عدد من الظواهر الفيزيائية والكيماوية.

وتكوّن لديهم انطباع بأن الظواهر البيولوجية ربما تسير وفق تلك القوانين أيضاً. ورسمت أدمغتهم صور الطحالب والخلايا والنباتات، أثناء مشاهدتهم لصور المُحاكاة الافتراضية عن ندف الثلوج.

وظهرت طُرُق عدّة لدرس ظواهر لا حصر لها، من الجُسيمات الميكروسكوبية إلى







التوازن بين الاستقرار والاضطراب: خلال عملية تحوّل السائل إلى بلّورات صلبة، تظهر رؤوس (الصورة أعلاه) بحدود غير مستقرة، فتتشعّب (إلى اليسار). وتتشابه نتيجة المُحاكاة الافتراضية للكومبيوتر مع الندف الحقيقي (الرسم الأعلى).

الظواهر المُعقّدة في الحياة اليومية. وفي الرياضيات الفيزيائية، تقدّمت نظرية فايينبوم وزملائه عن التفرّع فتبناها عدد من العلماء في الولايات المتحدة وأوروبا. وفي مجال الفيزياء النظرية، تقصى العلماء مواضيع جديدة مثل الفوضى في الميكانيكا الكمومية (الكايوس الكمومي). وحاولوا إيجاد أجوبة لأسئلة من نوع: هل تعترف الفيزياء الكمومية بُالفوضى التي تشير إليها الفيزياء التقليدية؟

في بحوثه عن حركة السوائل، صنع ألبرت ليبشابيه علبته الشهيرة التي حوت الهيليوم السائل؛ في حين درس بيار هولنبرغ وغونتر أهلرز الأشكال الغرائبية لموجات نقل الحرارة بالحمل. وفي الفلك، ركّز علماء الكايوس على الاضطرابات غير المتوقعة في الجاذبية الكونية لتفسير نشوء النيازك، تلك الصخور الخطرة التي تأتي من حزام الكويكبات قرب المريخ. واستخدم العلماء فيزياء النُّظُم الديناميكية لدراسة نظام جهاز المناعة عند الانسان، الذي يتألف من بلايين المُكوّنات، وقدرته على التعلّم والتذكر والملاحظة؛ وكذلك درسوا التطوّر على أمل التوصّل إلى نظرية شاملة عن التكيُّف. إن أولئك العلماء الذين صنعوا تلك النماذج لاحظوا بُنى تُكرّر نفسها، وتتنافس، وتتطور.

ورأى فورد: «يمكن النظر إلى التطوّر باعتباره عملية من التغذية الراجعة بالنسبة إلى نشوء الكايوس». صحيح أن القانون الثاني من الديناميكا الحرارية يشير إلى كون من الفوضى والتبدّد، لكن تلك الفوضى قد تصنع تعقيداً مُدهشاً. وكما اكتشف لورنز مُبكراً، فإن التبدُّد يعمل على صنع الانتظام. واستعاد فورد سؤال آينشتاين الشهير: «هل تنطبق قوانين النرد العشوائية على تشكّل الكون؟». وردّ بالايجاب، ولكنه ردّ مثقل بالقوانين التي تصف العشوائية، ومن ثم فإن معرفة تلك القوانين تشكل مهمة أساسية للفيزياء.

تُساعد تلك الأفكار على دفع الجهد العلمي الجماعي قُدُماً.

وتفيد التجربة تاريخياً أن لا فلسفة ولا تجربة ولا برهان، استطاع أن يثني العلماء عن التقصّي، بل يُفترض بالعلم أن يقدم وسائل لعمل هؤلاء. يحدث أن يتخبط العلم الطبيعي، كما أشار مايكل كون في تتبعه لتاريخ العلم. قد تفشل آلة ما في أداء ما يُتوقع

منها؛ وقد تظهر أشكال غير متوقعة. ولكن أحداً من العلماء لم يتبنَ منهج الكايوس إلا عندما أصبح ذلك ضرورة علمياً. من المستطاع العثور على أمثلة في حقول علمية متنوعة. ففي الأيكولوجيا (علم البيئة)، هناك وليام شافر الذي تدرّب على يد روبرت ماك آرثر وهو عميد ذلك الاختصاص في خمسينات القرن العشرين وستيناته. تبنى ماك آرثر مفهوماً عن الطبِيعة يعطي أرضية صلبة لفكرة التوازن الطبيعي.

وافترضت نماذجه وجود التوازن، وأن جموع الحيوانات والنباتات تبقى قريبة من نقطة التوازن عددياً. واعتبر ماك آرثر التوازن نوعاً من الأخلاق في الطبيعة، ولذا افترضت نماذجه بداهة السعي للاستعمال الأمثل لمصادر الغذاء، مع إصدار أقل تلوّث ممكن. واعتقد بأن الطبيعة تميل لأن تعمل في شكل طيّب. وبعد عقدين، أدرك تلميذه شافر أن الأيكولوجيا المبنية على الإحساس البديهي بالتوازن محكومة بالفشل. وتعلّم أن الطبيعة أشد تعقيداً من النماذج الخطيّة وتوازناتها. وفي المقابل، رأى شافر في الكايوس «وعداً وتهديداً». فبحسب رأي شافر، يضرب الكايوس أكثر المفاهيم ثباتاً في علم الأيكولوجيا. «ما يتبقى من المفاهيم الاساسية للأيكولوجيا لا يعدو كونه ضباباً قبل أن تضرب العاصفة... وإنها العاصفة اللاخطيّة تماماً».

واستعمل شافر الجواذب الغريبة لتقصي الأوبئة التي تُصيب الأطفال مثل الحصبة وجدري الماء. وقد جمع مُعطياته من سجلات مدينتي نيويورك وبالتيمور، ثم توسّع ليشمل أبردين، ثم إنكلترا وويلز. وصنع نموذجاً ديناميكياً، يشبه نظام رقّاص ساعة الحائط التقليدية، الذي يتحرك تلقائياً، وتدعمه طاقة تأتيه من الزنبرك، ويتأرجح بانتظام، ويميل إلى التباطؤ تدريجاً، قبل أن يتوقف كلياً. وفي كل عام تنتشر أمراض بين أطفال المدارس مدفوعة بقوتها الوبائية، وتواجهها المقاومة الطبيعية في أجساد أولئك الأطفال. ويتوقع نموذج شافر أن تتفاوت سلوكيات تلك الأمراض بشدة. إذ يفترض بمرض جدري الماء أن يتأرجح بصورة دورية في حين يُفترض بالحصبة أن تتصرف عشوائياً. وتُظهر المُعطيات أن الأمور تسير فعلياً على النحو الذي يفترضه نموذج شافر.

ومن وجهة نظر عالم بالأوبئة، يبدو شبه محتوم أن يُظهر انتشار الحصبة تقلّبات سنوية، وبطريقة عشوائية ومُشوشة. وأظهر شافر، باستخدام تقنيات إعادة تركيب فضاء الحال، أن انتشار الحصبة يتبع جاذباً غريباً، مع تغيُّر فراكتالي بأبعاد قليلة. واحتسب شافر مُعامِلات القوة للايبونوف وصنع خرائط بوانكاريه. ورأى أن انتشار الحصبة يتبع نمطاً كايوسيّاً معُ جواذب غريبة ومؤشرات عن وجود نظام في تلك الفوضى، مما يتيح بعض التوقع بالنسبة إلى سلوك المرض. وعندما تنخفض نسب الاصابة بالمرض، يصبح التوقّع صعباً، إذ يزيد السلوك اللامتوقع في انتشاره. ويُعطي نموذج شافر بعض التوقعات عن أثر حملات التلقيح العامة على معدل الإصابات سنوياً، وهذا ما تفشل في تقديمه النماذج التقليدية.

وسواء بالنسبة إلى جماعات العلماء أو أفرادهم، يُلاحظ تقدم أفكار نظرية الفوضى (الكايوس) بطرق مختلفة ولأسباب متنوعة. وفي حال شافر، حدث التحوّل من مفاهيم العلم التقليدي إلى مقولات الكايوس، بصورة غير متوقعة. فقد سمع في العام ١٩٧٥ بمقال روبرت ماي عن ضرورة أن يتعلم العلماء العمل مع «مُعادلة الفارق اللوجستي». وسابقاً، مال للاعتقاد بأن الرياضيات لا تلائم العوالم الحقيقية للأيكولوجيا. وفي المقابل، فإن تضلّعه في علم الأيكولوجيا جعله يحدس بأن مقولات ماي لها ما يُبرّرها. كما فكّر في أن ما يقترحه ماي لا يزيد على كونه خرائط ذات بُعد وحيد، فما فائدتها بالنسبة لنُظُم حيّة تتغيّر باستمرار؟ عند هذه النقطة، نصحه أحدهم بقراءة عمل لورنز عن الجاذب الغريب. ولم يستجب لذلك النُّصح. وبعد سنوات، انتقل شافر للعيش في الصحراء قرب مدينة «توكسن» بولاية أريزونا. واعتاد الذهاب إلى جبال سانتا كروز صيفاً، التي تقل حرارة بكثير عن تلك الصحراء. وفي شهري حزيران (يونيو) وتموز (يوليو)، بين نهاية الربيع وقبل فترة الأمطار الصيفية، لاحق شافر وتلامذته مجاميع النحل والأزهار من مكان إلى آخر؛ إذ يسهل قياس تلك الأعداد على رغم تغيّرها سنوياً. وأحصى شافر النحل بدقة، وأحصى حتى طلع الأزهار. وحلّل تلك الأرقام بطرق رياضيَّة.

وظهر نوع من التناغم بين أعداد النحل العامل وذاك الذي يصنع العسل. واستطاع شافر ابتكار نموذج لشرح التقلبات السنوية في أعداد النحل.

وفي العام ١٩٨٠، أدرك أن ثمة خطأ في نموذجه الذي توقّف فجأة عن العمل. وتبيّن أن السبب يرجع إلى نوع دأب شافر على تجاهله: النمل. ولإنقاذ الموقف، اقترح بعض أعضاء فريقه انتظار صيف استثنائي، أو شتاء استثنائي. ولكن شافر اعتقد بضرورة جعل النموذج أكثر تعقيداً، عبر إضافة المزيد من المتغيّرات. وسرى القول بين الطلبة إن قضاء الصيف، على ارتفاع خمسة آلاف قدم، بصحبة شافر هو أمر شاق. وسرعان ما تغيّر كل شيء.

فقد عثر شافر على ورقة علمية تصف الكايوس في الكيمياء، من خلال تجربة مُعقّدة في المختبر. وأحسّ بأن أصحاب الورقة واجهوا المشاكل عينها التي عاشها: صعوبة التعامل مع عشرات عناصر التغيير في وقت واحد.

ومع ذلك فقد حققوا نجاحاً حيث أخفقت جهوده. وتوسّع في القراءة عن إعادة صوغ فضاء الحال. وأخيراً، قرأ أعمال لورنز ويورك وغيرهما من علماء الكايوس. كما حرص على متابعة سلسلة مُحاضرات رعتها جامعة أريزونا تحت عنوان «النظام في الفوضى»، وألقاها هاري سويني. وقد برز سويني في شرح تجارب المختبرات. وعندما وصل سويني إلى الحديث عن الكايوس في الكيمياء، وعرض صوراً عن الجاذب الغريب، أحسّ شافر برعشة قوية: لقد عثر على مبتغاه. وسارع لأخذ سنة تفرغ غير مدفوعة الأجر. «لقد أدركت أنه قدري». وألغى طلبه الانضمام إلى «المؤسسة الوطنية (الاميركية) للعلوم». وأبدله بطلب لـ«جمعية كانينغهام». وفي الجبال، علم أن أعداد النمل تتغير فصلياً، وأن أسراب النحل تطن وتطير بنظام ديناميكي. وفوق رأسه، عبرت غيوم في السماء. ومن الآن فصاعداً، لم يعد في استطاعته العمل بالطريقة القديمة علمياً.

فهرس الأعلام

فهرس الأماكن

تبتدئ نظريّة الفوضى (كايوس) من الحدود التي يتوقّف عندها العلم التقليدي ويعجز. فمنذ شرع العلم في حلّ ألغاز الكون، عانى دوماً من الجهل بشأن ظاهرة الاضطراب، مثل تقلّبات المناخ، وحركة أمواج البحر، والتقلّبات في الأنواع الحيّة وأعدادها، والتذبذب في عمل القلب والدماغ. إن الجانب غير المنظّم من الطبيعة، غير المنسجم وغير المتناسق والمفاجئ والانقلابي، أعجز العلم دوماً.

وشرعت تلك الصورة في التغيّر تدريجاً في سبعينات القرن العشرين، عندما همّت كوكبة من العلماء الأميركيين والأوروبيين للاهتمام بأمر الاضطراب وفوضاه. وتألّفت تلك الكوكبة من علماء الفيزياء والرياضيات والبيولوجيا والكيمياء، سعوا للإمساك بالخيوط التي تجمع ظواهر الفوضى كلّها.

من هذه الزاوية يمكن فهم عبارة من نوع "إن رفّة جناحي فراشة في الهند قد تحدث فيضانات في نهر الأمازون".

بعد قراءة هذا الكتاب، لن تنظر إلى العالم بالطريقة التي اعتدت أن تراه فيها من قبل.

DAR AL SAQI
دار الساقي

مركز البابطين للترجمة
ALBABTAIN TRANSLATION CENTER